

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky – 330

**Návrh hemisféry pro měření hladiny akustického
výkonu dle ISO 3745**

**Development of the Hemisphere for Measuring of Sound
Power Level According to ISO 3745**

Diplomová práce

Student:

Bc. Vojtěch Machalla

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Michal Weisz, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vojtěch Machalla**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **3901T003 Aplikovaná mechanika**
Téma: **Návrh hemisféry pro měření hladiny akustického výkonu dle ISO 3745**
Development of the Hemisphere for Measuring of Sound Power Level
According to ISO 3745
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí současného stavu problematiky měření hluku, zaměřené na úlohu stanovení hladiny akustického výkonu zdroje hluku.
2. Rozbor metody měření dle ISO 3745, návrh měřicí plochy vyhovující potřebám společnosti Honeywell Brno.
3. Kompletní technický návrh hemisféry pro měření hladiny akustického výkonu.
4. Návrh matematického modelu pro výpočet hladiny akustického výkonu.
5. Verifikační měření hladiny akustického výkonu v bezodrazové místnosti společnosti Honeywell Brno, s užitím prototypu hemisféry, zhotoveného na základě vypracované dokumentace.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] SMETANA, C. Hluk a vibrace, měření a hodnocení. Praha: Sdělovací technika, 1998. 188 s.
- [2] NOVÝ, R. Hluk a chvění. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1995. 386 s.
- [3] EN ISO 3745 Akustika - Určení hladiny akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti.
- [4] EN ISO 3744 Akustika - Určení hladiny akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Technická metoda ve volném poli nad odrazivou rovinou.
- [5] COCKER, J. M. Handbook of Noise and Vibration Control. USA: John Wiley & Sons, Inc. 2007. 1038 s.
- [6] RANDALL, F. B. Industrial Noise Control and Acoustics. Louisiana: Marcel Dekker, Inc. 2003. 534 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Weisz, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017

doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Čestné prohlášení studenta:

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. 5. 2017

Vojtěch Machalík
.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užit tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užit dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užit toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 18.5.2017

Vojtěch Machalla

Na Chromině 586/87, Hat'

Vojtěch Machalla

Anotace:

Machalla, V.: *Návrh hemisféry pro měření hladiny akustického výkonu dle ISO 3745*. Ostrava, 2017. Diplomová práce. VŠB Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky. Vedoucí práce Weisz, M.

Předložená diplomová práce se zabývá návrhem speciálního zařízení pro měření akustického výkonu, tzv. hemisféry dle normy ČSN ISO 3745. Práce je rozdělena do několika částí. V teoretickém rozboru je vysvětlena základní terminologie z oblasti šíření zvuku. Postupně tato kapitola dále směřuje k podstatě měření hluku a následnému určení akustického výkonu, který vyzařuje zdroj hluku. V dalším bodě osnovy práce je probrána norma ČSN ISO 3745. Téma práce vzniklo na základě požadavků společnosti Honeywell, které v loňském roce VŠB – TU Ostrava dodala bezodrazovou místnost. Proto jsou v dalším bodě rozebrány požadavky společnosti Honeywell. Ve vazbě na tyto požadavky je následně proveden technický návrh hemisféry. Jsou zde popsány prvky, ze kterých se hemisféra skládá a jaké omezení jsou na ně kladeny. Po vyrobení hemisféry byl vytvořen matematický model, který určuje základní postup výpočtu hladiny akustického výkonu. Následně bylo provedeno verifikační měření v polobezodrazové místnosti, kde byl použit referenční zdroj hluku. Hladiny akustického výkonu pro jednotlivé oktávy tohoto zdroje jsou určeny výrobcem a slouží k porovnání s naměřenými hodnotami. V samotném závěru této práce je provedeno vyhodnocení za účelem posouzení, zda hemisféra funguje správně.

Annotation:

Machalla, V.: *Development of the Hemisphere for Measuring of Sound Power Level According to ISO 3745*. Ostrava, 2017. Master Thesis. VŠB Technical university Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics. Head of Master Thesis Weisz, M.

This master thesis deals with a design of a special device for measuring sound power level according to ISO 3745. This special device is called a hemisphere. This thesis was divided into several parts. The theoretical part explains a basic terminology of sound propagation. This chapter continues to the essence of measuring noise and subsequent determination of the sound power that generates of source noise. In the next part of the thesis ISO 3745 is explained. The topic of the thesis was based on the requirements of company Honeywell, which received an anechoic chamber from VŠB – TU Ostrava last year. The requirements of company Honeywell are explained in the next part. In relation to these requirements a technical design of the hemisphere was created. There is the description of the elements from which the hemisphere consists of and also there is a mention of what limitations are placed on them. After the creation of the hemisphere, a mathematical model was created. This mathematical model determines a basic process for calculation of the sound power level. Subsequently, there was a verification measurement in semianechoic chamber, where the reference noise source was used. The sound power levels for the individual octaves of this source are determined by a manufacturer. The values determined by the manufacturer were used to compare them with the measured values. At the end of this thesis, an evaluation was carried out to assess whether the hemisphere is working properly.

Obsah

Seznam použitých znaků a symbolů:.....	9
Seznam obrázků:.....	12
Seznam tabulek:.....	13
1. Úvod:	14
2. Teoretický rozbor:	16
2.1 Zvuk:	16
2.2 Hladina akustického tlaku:	17
2.3 Křivky konstantní hlasitosti:	19
2.4 Frekvenční pásma:	21
2.5 Váhové filtry:	21
2.6 Akustická pole:	22
2.7 Měření hluku:	24
2.7.1 Měření a zpracování akustických veličin.....	25
2.8 Elektroakustický měnič - mikrofon:	26
2.8.1 Elektrodynamické mikrofony:	26
2.8.2 Kondenzátorové mikrofony:	27
2.9 Akustický výkon:	28
2.9.1 Určení hladin akustického výkonu z měření akustického tlaku:	29
2.9.2 Určení hladin akustického výkonu z měření akustické intenzity:	34
2.10 Shrnutí současného stavu řešené problematiky:	35
3. Rozbor metody měření dle normy ČSN ISO 3745:	37
3.1 Zdroje a typy hluku:	37
3.2 Měřicí plocha dle normy ČSN ISO 3745	38
3.2.1 Rozložení mikrofونů:	39
4. Praktická část	41
4.1 Návrh měřicí plochy vyhovující potřebám společnosti Honeywell:	42
4.1.1 Požadavky společnosti Honeywell:	43
4.1.2 Průzkum trhu:	44
4.2 Technický návrh hemisféry pro měření akustických výkonů:	44
4.2.1 Komponenty hemisféry:	45
4.3 Návrh matematického modelu pro výpočet hladiny akustického výkonu: ...	49
4.3.1 Korekce na hluk pozadí:	51
4.3.2 Korekční faktory C_1 , C_2 , a C_3 :.....	51
4.4 Verifikační měření hladiny akustického výkonu:	52
4.4.1 Popis měření:	52

4.4.2	Schéma měření:.....	53
4.4.3	Použité přístroje:	54
4.4.4	Nastavení hemisféry:	57
4.4.5	Výsledky měření:	57
5.	Vyhodnocení výsledku:	58
6.	Závěr:.....	64
7.	Seznam použité literatury:.....	65

Seznam použitých znaků a symbolů:

A_0	Číselná hodnota	[-]
C_1	Korekce na výchozí veličiny	[dB]
C_2	Korekce na akustickou vyzařovací impedanci	[dB]
C_3	Korekce na pohltivost vzduchu	[dB]
E	Akustická energie	[J]
I	Akustická intenzita	[W/m ²]
K_1	Korekční faktor na hluk pozadí	[dB]
L_p	Hladina akustického tlaku	[dB]
L	Hladina akustického tlaku	[dB]
L_1	Hladina akustického tlaku	[dB]
L_2	Hladina akustického tlaku	[dB]
ΔL	Rozdíl hladin akustického tlaku zdroje a pozadí	[dB]
L_p'	Hladina akustického tlaku pro zdroj hluku	[dB]
L_p''	Hladina akustického tlaku pro hluk pozadí	[dB]
L_{pf}	Průměrná hladina akustického tlaku na měřící ploše	[dB]
$L_{pf,celk}$	Celková hladina akustického tlaku na měřící ploše	[dB]
L_w	Hladina akustického výkonu	[dB]
N	Počet bodů zvolených na měřící ploše	[-]
S	Měřicí plocha	[m ²]
S_0	Referenční hodnota měřicí plochy	[m ²]

T	Teplota	[°C]
U	Elektrické napětí	[V]
W	Akustický výkon	[W]
W ₀	Referenční hodnota akustického výkonu	[W]
c	Rychlost šíření zvuku	[m/s]
d ₀	Charakteristický rozměr	[mm]
f	Frekvence	[Hz]
f ₁	Dolní frekvence oktávy	[Hz]
f ₂	Horní frekvence oktávy	[Hz]
f _{STR}	Střední frekvence oktávy	[Hz]
h ₀	Vzdálenost mezi akustickým středem zdroje hluku a podlahou	[mm]
i	Číslo bodu na měřicí ploše	[-]
l ₁	Rozměr zdroje zvuku	[mm]
l ₂	Rozměr zdroje zvuku	[mm]
l ₃	Rozměr zdroje zvuku	[mm]
p	Akustický tlak	[Pa]
p ₀	Referenční hodnota akustického tlaku	[Pa]
p _{s,0}	Referenční statický tlak	[Pa]
p _s	Statický tlak v době a místě zkoušky	[Pa]
r	Měřicí poloměr	[mm]
r _{k1}	Měřicí poloměr	[mm]
r _{k2}	Měřicí poloměr	[mm]

t	Čas měření	[t]
v	Akustická rychlost	[m/s]
x	Souřadnice ve směru osy x	[mm]
y	Souřadnice ve směru osy x	[mm]
z	Souřadnice ve směru osy x	[mm]
z_0	Měrná akustická impedance	[Ns/m ³]
λ	Vlnová délka	[mm]
θ	Teplota vzduchu v době a místě zkoušky	[°C]
θ_0	Teplota, při statickém tlaku $p_{s,0}$	[°C]
HP	Hi Pass filtr	
LP	Low Pass filtr	
BP	Band Pass filtr	

Seznam obrázků:

Obr. 1: Přístroj na měření rychlosti zvuku z 19. století	15
Obr. 2: Křivky konstantní hlasitosti	20
Obr. 3: Oblasti sluchového pole	20
Obr. 4: Akustická pole v uzavřené místnosti	23
Obr. 5: Vlnová délka	23
Obr. 6: Schéma uzavřeným prostorem místnosti	24
Obr. 7: Schéma měřené soustavy	26
Obr. 8: Schéma elektrodynamického mikrofону	27
Obr. 9: Elektrodynamický mikrofon	27
Obr. 10: Schéma kondenzátorového mikrofону	28
Obr. 11: Kondenzátorový mikrofon	28
Obr. 12: Schéma měřicí plochy pro přepočet hladiny akustického tlaku na hladinu akustického výkonu - polokoule	30
Obr. 13: Schéma měřicí plochy pro přepočet hladiny akustického tlaku na hladinu akustického výkonu – rovnoběžnostěn	31
Obr. 14: Označení na stroji	34
Obr. 15: Označení na stroji	34
Obr. 16: Šíření zvuku od bodového zdroje	34
Obr. 17: Pokles akustického tlaku	36
Obr. 18: Pokles akustické intenzity	36
Obr. 19: Zkoušený zdroj hluku – charakteristický rozměr	38
Obr. 20: Polohy mikrofónu na polokulové měřicí ploše (obecný případ)	40
Obr. 21: Fotka - bezodrazová místnost	42
Obr. 22: Fotka - polo bezodrazová místnost	43
Obr. 23: Hemisféra od firmy G.R.A.S.	44
Obr. 24: Skružený prut s oploštěním na konci	45
Obr. 25: Spojka 1 – pro spojení prutů	46
Obr. 26: Spojka 2 – pro spojení prutů	46
Obr. 27: Spojka tvaru hvězdy	47
Obr. 28: Kleština	47
Obr. 29: Držák na mikrofon	48
Obr. 30: Sestava mikrofónu, spojovací tyče, držáku a kleštiny	48
Obr. 31: Model hemisféry	49
Obr. 32: Vývojový diagram – Postup výpočtu	50

Obr. 33: Fotografie z měření	53
Obr. 34: Schéma měření	53
Obr. 35: Mikrofon použitý při měření	54
Obr. 36: Měřicí zařízení	54
Obr. 37: Zdroj hluku – ventilátor	55
Obr. 38: Srovnání hladin akustického výkonu dané výrobcem a získaných z měření	61
Obr. 39: Srovnání s nejistotou měření ventilátoru	62
Obr. 40: Srovnání s nejistotou měření ventilátoru a polo bezodrazové místnosti	63

Seznam tabulek:

Tab. 1: Příklady rozsahu frekvenčního pásma pro jednotlivé živočichy	16
Tab. 2: Rychlost šíření zvukové vlny podle prostředí	17
Tab. 3: Akustický tlak u různých zdrojů zvuků	18
Tab. 4: Hodnoty korekcí – váhový filtr A	22
Tab. 5: Normou předepsané polohy mikrofону	41
Tab. 6: Hodnoty hluku – referenčního zdroje	56
Tab. 7: Pozice mikrofону – vzhledem ke středu hemisféry	57
Tab. 8: Hodnoty získané při verifikačním měření – vážené váhovým filtrem A	58
Tab. 9: Hodnoty dané výrobcem referenčního zdroje hluku – vážené váhovým filtrem A	59
Tab. 10: Porovnání získaných dat z měření a dat daných výrobcem ventilátoru	60
Tab. 11: Směrodatná odchylka pro 2. třídu přesnosti polo bezodrazové místnosti	62

1. Úvod:

Akustika je jedním z nejstarších oborů fyziky. Jedná se o vědní obor, který se zabývá vznikem zvukových vln, jejich šířením a sluchovým vnímáním zvuku. Akustika má mnoho podoblastí, které se dělí podle oblasti zájmu. Význam slova akustika pochází z řeckého slova „*akoustikós*“, což přibližně znamená „připraven slyšet“ nebo z řeckého slova „*akoúo*“, což vyjadřuje „slyším“. [3] [2]

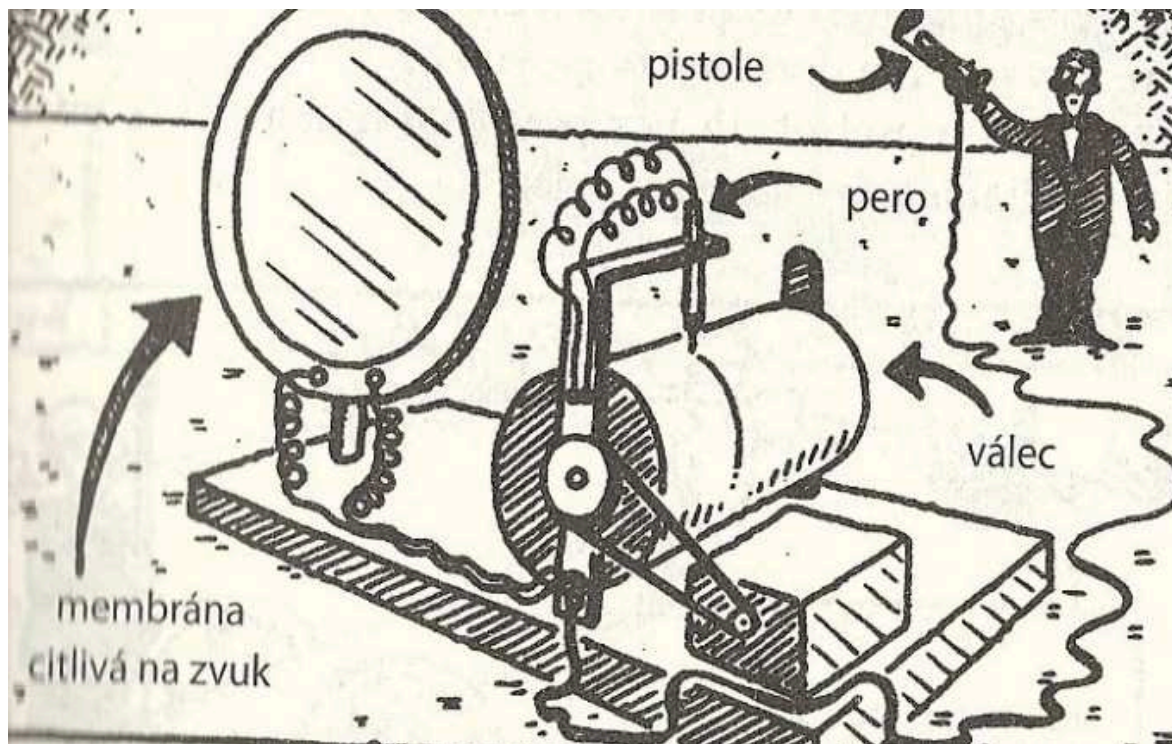
Jako první studovali různé zvuky už staří Číňané a to již 3000 let před naším letopočtem. Akustikou se také zabýval Aristoteles, který zkoumal šíření zvuku ve vzduchu, Pythagoras, Galileo Galilei či Leonardo da Vinci. Je vidět, že kořeny akustiky jsou velmi hluboké a opírají se o badatele zvučných jmen. [4]

Historie měření rychlosti zvuku sahá až do 17. století. Jako první se pokusil změřit rychlost zvuku Marin Mersenne. Tento františkánský mnich byl první, kdo se pokusil změřit rychlost zvuku ve vzduchu. Někdy je nazýván „otcem akustiky“. Ke svému experimentu využil kanón. Svému příteli nařídil, ať vystřelí z kanónu, zatímco on v určité vzdálenosti sledoval záblesk u hlavně při výstřelu. V momentě výstřelu začal stopovat čas až do okamžiku, kdy k němu dorazil zvuk výstřelu. Neměl však k dispozici přesné zařízení pro měření času, a tak počítal úderu vlastního srdce. Jeho odhad se pohyboval okolo 430 m/s. Na přesnější měření vědci potřebovali lepší vybavení. Velký pokrok v měření rychlosti zvuku udělal francouzský vědec Henri Regnault. Ten v 19. století sestrojil důmyslný přístroj, který už využíval elektrický proud. Byl složený z válce, na nějž byl připojený zapisovač. Válec se otáčel pravidelnou rychlostí a zapisovač na povrchu tohoto válce kreslil čáru. K zapisovači byly připojeny dva elektrické obvody. K jednomu obvodu byla připojena pistole a k druhému obvodu membrána. Regnault vystřelil z pistole, membrána zaregistrovala zvuk z výstřelu, čímž došlo k posunutí zapisovače. Jelikož znal rychlost otáčení válce a velikost posunutí zapisovače, tak mohl zjistit, s jakou rychlostí pokus proběhl. Při svém experimentu naměřil rychlost zvuku ve vzduchu 339 m/s. Experiment je znázorněn na obrázku 1. [5]

V současnosti je měření hluku velmi probíraným tématem. Nadměrný hluk má negativní vliv na lidský organismus. Na základě toho se vyvíjejí nové metody, jak hluk účinně a rychle změřit. Pokud známe zdroj hluku, pak můžeme vybrat efektivní metodu pro jeho snížení.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem hemisféry, která slouží pro rychlé, přesné a efektivní měření akustického výkonu. Hemisféra je stojan, ve kterém jsou pevně

uchyceny mikrofony. Umístění těchto mikrofónů je stanoveno normou a jsou zaměřeny na objekt vydávající hluk. Tato hemisféra je pro firmu Honeywell. Firma Honeywell je nadnárodní společnost, která má pobočku v Brně. V Brně se nachází vývojové a výzkumné centrum, kde mají postavenou bezdrazovou místnost. V této místnosti pak bude umístěna tato hemisféra.



Obr. 1: Přístroj na měření rychlosti zvuku z 19. století

Zdroj: <http://fyzmatik.pise.cz/184-historie-mereni-rychlosti-zvuku.html>

2. Teoretický rozbor:

Následující teoretický rozbor se bude zabývat základní terminologií o šíření zvuku. Bude zde probráno, jak se zvuk šíří, za jakých podmínek se šíří, co to jsou křivky konstantní hlasitosti, co je to hladina akustického tlaku, jaká akustická pole se nachází v oblasti zdroje hluku a jak je rozlišujeme. Celá tato kapitola bude směřovat k principu měření hluku a určení hladiny akustického výkonu. Nakonec budou shrnuty výhody, proč je lepší určit akustický výkon než akustický tlak či akustickou intenzitu.

2.1 Zvuk:

Zvuk je z fyzikálního hlediska mechanické vlnění hmotných částic, které se šíří v látkovém prostředí. Lidské ucho je schopno vnímat toto vlnění ve frekvenčním pásmu od 16 Hz do 20 000 Hz, avšak je to dost individuální. Někteří mladí lidé dokážou slyšet frekvence i mírně nad 20 000 Hz. S přibývajícím věkem se v ušním bubínku začíná hromadit vápník. Následkem toho ušní bubínek přestává být pružný. Tím pádem se horní hranice z frekvenčního pásma značně snižuje. Frekvence mechanického vlnění se při běžném lidském hovoru pohybuje mezi 200 – 800 Hz. Někteří živočichové používají sluch k orientaci v prostoru. Vysílají zvukové signály, které se odrážejí od překážek a podle toho jsou schopni určit jejich velikost a vzdálenost. Rozsah frekvenčního pásma slyšitelnosti pro různé typy živočichů můžeme vidět v tabulce 1.

Tvor	Frekvenční pásmo slyšitelnosti [Hz]
Člověk	20 – 20 000
Kočka	45 – 65 000
Pes	50 – 45 000
Delfín	75 – 150 000
Myš	1 000 – 100 000
Slon	5 – 12 000
Netopýr	2 000 – 120 000

Tab. 1: Příklady rozsahu frekvenčního pásma pro jednotlivé živočichy

Zvuk, který je pod hranicí slyšitelnosti 20 Hz, nazýváme infrazvuk nebo také „subsonický zvuk“. Tento zvuk má nepříznivé účinky na lidský organismus i psychiku člověka. Je těžké ho eliminovat a vzniká například v letadle nebo ve vlaku. Způsobuje pocity podrážděnosti a přecitlivělosti. Zvuk, který je nad hranicí slyšitelnosti 20 000 Hz, nazýváme ultrazvuk nebo také „supersonický zvuk“.

Aby mohl zvuk vzniknout, musí existovat zdroj zvuku. Dále musí existovat vodič. Vodičem je myšleno hmotné prostředí, díky němuž se zvuk dostane k přijímači. Vodičem může být například vzduch, voda nebo ocel. Ve vakuu není žádné hmotné prostředí, proto se zvuk ve vakuu nešíří.

Rychlost šíření zvuku je závislá na fyzikálních vlastnostech prostředí. Ve vzduchu závisí rychlost zvuku pouze na teplotě. Při referenční teplotě 25 °C, dosahuje rychlost šíření zvuku ve vzduchu $c = 346,3$ m/s. S rostoucí teplotou se rychlost šíření zvuku zvyšuje.

Následující vztah je převzatý z [15]:

Vzorec pro rychlost šíření zvuku ve vzduchu je následující:

$$c = 331,6 \cdot \sqrt{1 + \frac{T}{273,13}} \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

Kde: T – teplota ve stupních Celsia

Prostředí	Rychlost šíření vlny [m/s]	Prostředí	Rychlost šíření vlny [m/s]
Ocel	5200	Papír	2000
Sklo	5300	Voda	1450
Olovo	1500	PVC	850

Tab. 2: Rychlost šíření zvukové vlny podle prostředí

Tabulka 2 ukazuje rychlost šíření zvukové vlny pro různá prostředí.

2.2 Hladina akustického tlaku:

Zvuk v naprosté většině případů vzniká chvějícími nebo kmitajícími tělesy, která předávají část energie hmotnému pružnému prostředí, přičemž existence pružného a hmotného prostředí okolo zdroje zvuku je podmínkou pro jeho šíření.

Zvuková vlna jakož to rozruch v akustickém prostředí způsobuje zředování a zhušťování vzduchu. Díky pohybu zvukové vlny dochází ke změně tlaku vzduchu. Na základě experimentu bylo zjištěno, že člověk je schopen vnímat zvuk až od určitého akustického tlaku. Z experimentu následně vyšlo, že minimální hodnota, kterou je lidský sluchový orgán možný zaznamenat, je $20 \mu\text{Pa}$ a to při frekvenci 1000 Hz. Tato hodnota pak byla označována jako práh slyšitelnosti. Na druhé straně existuje i práh bolesti. Za práh bolesti označujeme hodnotu akustického tlaku 100 Pa (140dB). V tabulce 3 je uvedena hladina akustického tlaku v [dB] a akustický tlak v [Pa] pro různé zdroje zvuku. Uvedená škála je v rozmezí od prahu slyšitelnosti až po práh bolesti. Rozsah tabulky 3 je vztažen na člověka.

Akustický tlak p [Pa] – Je efektivní hodnota střídavé složky tlaku v pružném prostředí, která se superponuje na tlak barometrický.

Hladina akustického tlaku L_p [dB]	Akustický tlak p [Pa]	Zdroj zvuku
150	632	Start letadla ve vzdálenosti 25 m.
140	200	Start letadla ve vzdálenosti 50 m.
130	62,3	Start letadla ve vzdálenosti 100 m.
120	20	Hudební festival – živá rocková muzika
110	6,23	Motorová pila
100	2	Sekačka na trávu
90	0,62	Kuchyňský mixér
80	0,2	Nákladní auto
70	0,062	Vyzvánění telefonu
60	0,02	Běžný hovor
50	0,006	Tichý hovor
40	0,002	Vrčící lednička
30	0,0006	Tikot hodin
20	0,0002	Tichá místnost
10	0,00006	Dýchání
0	0,00002	Prah slyšitelnosti

Tab. 3: Akustický tlak u různých zdrojů zvuků

Lidské ucho vnímá zvuk dosti nelineárně. Lze však s velkou přesností vnímání zvuku aproximovat logaritmickou křivkou. Charakter vnímání zvuku lidského ucha nám přináší výhody. Velký rozsah vnímání a schopnost rozlišovat zvuk i při velmi malých podnětech. Akustický tlak pak vyjadřujeme v hladinovém vyjádření. To znamená, že závislost úrovně sluchového vjemu na akustickém tlaku aproximujeme logaritmickou křivkou.

Následující vztahy jsou převzaty z [15].

Rovnice pro výpočet hladiny akustického tlaku pak vypadá:

$$L_p = 10 \cdot \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \text{ [dB]} \quad (2)$$

po úpravě pak bude mít tvar:

$$L_p = 20 \cdot \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ [dB]} \quad (3)$$

kde: p [Pa] - akustický tlak zjištěný měřením,

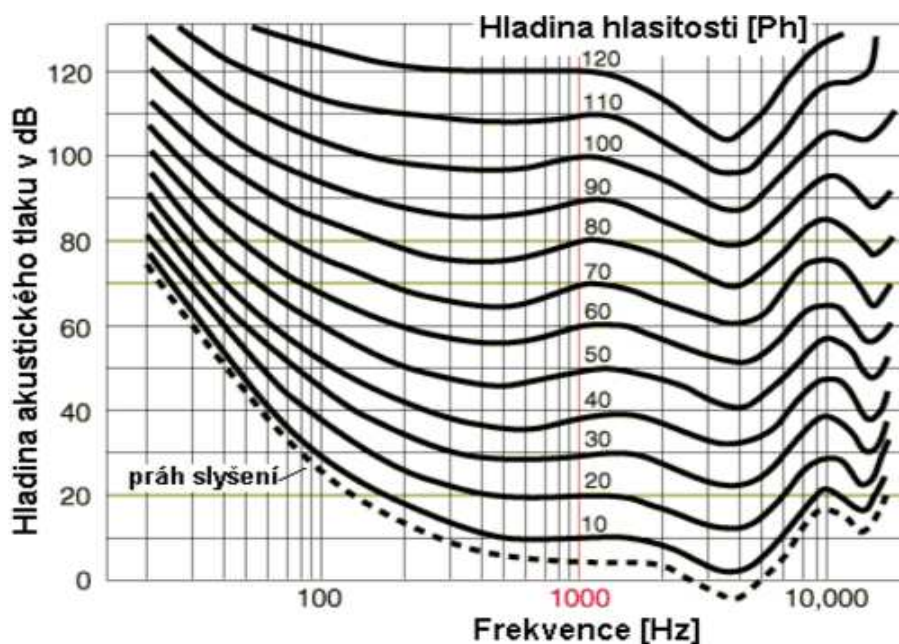
p_0 [Pa] – referenční hodnota akustického tlaku (0,00002 Pa),

L_p [dB] – hladina akustického tlaku,

2.3 Křivky konstantní hlasitosti:

V následující kapitole je nastíněno, co jsou křivky konstantní hlasitosti. Z pohledu měření jsou z křivek konstantních hlasitostí odvozeny váhové filtry. V praxi je nejběžněji používán váhový filtr typu A, který je použit při verifikačním měření hladiny akustického výkonu této diplomové práce.

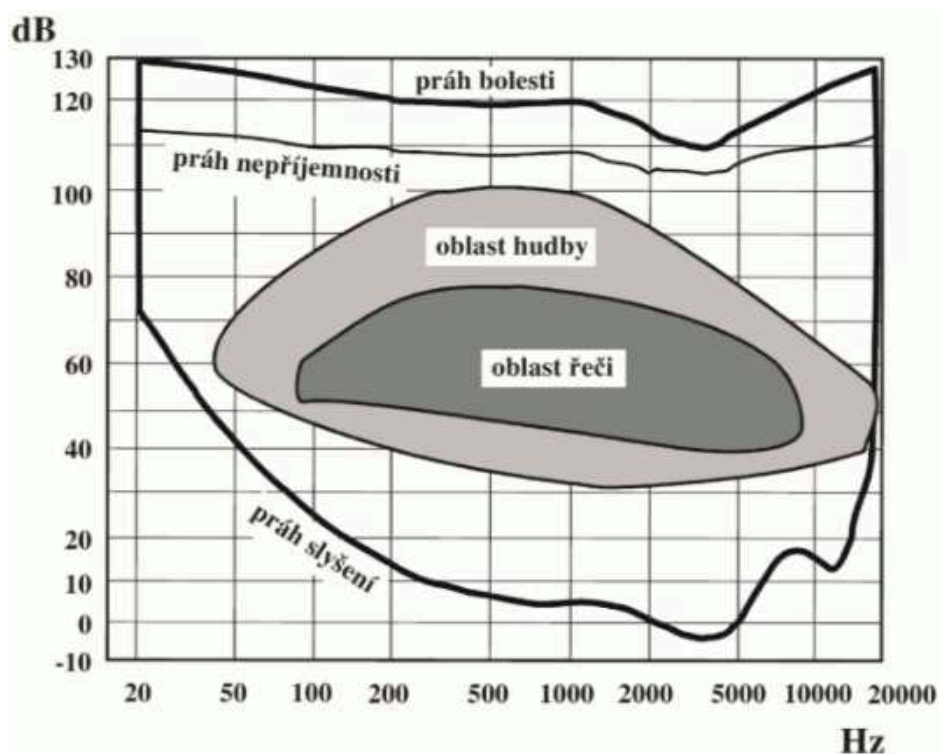
Kromě toho, že závislost vnímání zvuku na změně akustického tlaku je nelineární, má lidské ucho ještě jednu specifickou vlastnost. Touto vlastností je odlišná vnímavost zvuku na různých frekvencích. To znamená, že při měnící se frekvenci a zároveň měnícím se akustickém tlaku lidské ucho dostává stejný zvukový vjem.



Obr. 2: Křivky konstantní hlasitosti

Zdroj: http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm

Na obrázku 2 jsou vidět křivky konstantní hlasitosti. Tyto křivky jsou odstupňovány po deseti Fónech. Fón je jednotka úrovně hlasitosti pro čisté tóny. Jeho účelem je kompenzace účinku frekvence na vnímanou hlasitost tónů. Tyto křivky pak vymezují oblast slyšení. Je vidět, že s rostoucí hladinou akustického tlaku se křivky konstantní hlasitosti vyrovnávají. Dále pak na obrázku 3 je zobrazeno sluchové pole člověka, které je ohraničené prahem bolesti a prahem slyšení.



Obr. 3: Oblasti sluchového pole

Zdroj: http://if.vsb.cz/bf/32.html#problem_2

2.4 Frekvenční pásma:

Většina měření, která se provádí, vyhodnocujeme ve frekvenční škále od 20 Hz do 20 000 Hz. Důvodem je, že většina měření je vztažena ke člověku, protože člověk v této oblasti slyší. Tato kapitola pojednává o tom, jak se frekvenční škála dělí.

Frekvenční pásma v akustice používáme pro dělení frekvenční osy na nestejně velké úseky. Celé frekvenční pásmo slyšitelnosti je rozděleno do 11 oktáv. Frekvenční osa začíná na 16 Hz a končí na 16 000 Hz. Každá oktáva je určena horní, dolní a střední frekvencí.

Následující vztahy jsou převzaty z [17].

Poměr mezi horní f_2 a dolní f_1 frekvencí je dán vztahem:

$$\frac{f_1}{f_2} = 2 \quad (4)$$

Pro střední frekvenci oktávy, kterou je oktáva označována, pak platí vztah:

$$f_{STR} = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad [Hz] \quad (5)$$

kde horní frekvence:

$$f_2 = f_{STR} \cdot \sqrt{2} \quad [Hz] \quad (6)$$

a dolní frekvence:

$$f_1 = f_{STR} \cdot \sqrt{2} \quad [Hz] \quad (7)$$

Frekvenční spektrum se pak dle normy dělí na oktávová pásma. Každé pásmo je následně určeno střední frekvencí:

16,5	31	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
------	----	----	-----	-----	-----	------	------	------	------	-------

Vyžaduje-li to charakter měření, dá se každé oktávové pásmo dále dělit na třetiny, šestiny, dvanáctiny nebo dvacet čtvrtiny.

2.5 Váhové filtry:

Cílem mnoha odborníků je na změřené frekvenční spektrum aplikovat takový váhový filtr, aby se skutečné hladiny měřených veličin převedly na úroveň, jakou jim přidělí lidský sluchový aparát. Zjednodušeně se dá říci, že váhové filtry jsou inverzní funkce ke křivkám konstantní hlasitosti. V dnešní době ještě nebyl vyvinut univerzální váhový filtr, který by se dal použít na všechny typy úloh. Většinou se používají čtyři váhové filtry, které se označují A, B, C a D. Váhové filtry pro oktávová a třetinooktávová pásma jsou dány tabulkovými hodnotami, které se musí v jednotlivých pásmech odečíst.

Nejčastěji se pro běžné měření používá váhový filtr A. V tabulce 4 jsou uvedeny hodnoty korekcí pro váhový filtr A. Je-li jakýkoliv váhový filtr při vyhodnocení výsledku použit, musí být uveden ve výsledném grafu nebo v označení číselného výsledku.

Frekvence [Hz]	Korekce [dB]	Frekvence [Hz]	Korekce [dB]	Frekvence [Hz]	Korekce [dB]
20	-50,5	250	-8,6	2 500	1,3
25	-44,7	315	-6,6	3 150	1,2
32	-39,4	400	-4,8	4 000	1
40	-34,6	500	-3,2	5 000	0,5
50	-30,2	630	-1,9	6 300	-0,1
63	-26,2	800	-0,8	8 000	-1,1
80	-22,5	1 000	0	10 000	-2,5
100	-19,1	1 250	0,6	12 500	-4,3
125	-16,1	1 600	1	16 000	-6,6
160	-13,4	2 000	1,2	20 000	-9,3
200	-10,9				

Tab. 4: Hodnoty korekcí – váhový filtr A

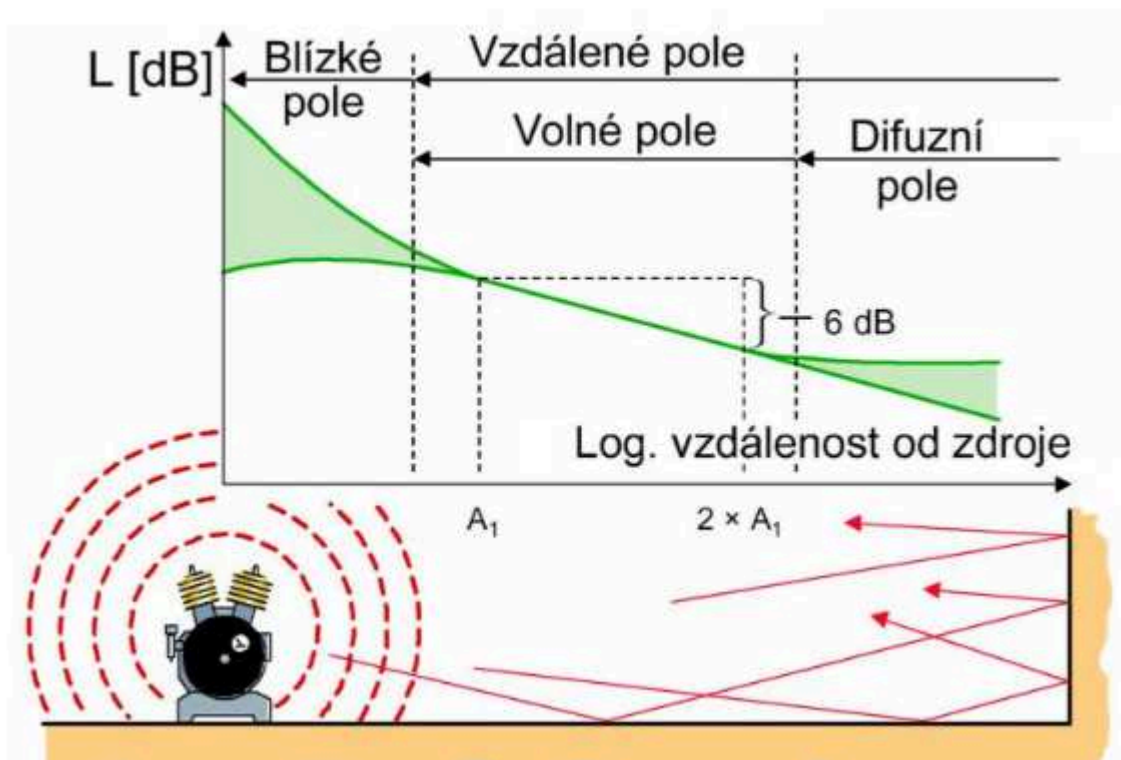
2.6 Akustická pole:

Následující kapitola bude pojednávat o tom, jaké oblasti zvukových polí se nachází v okolí zdroje hluku a jaký mají dopad jednotlivá pole na měření.

Oblast, ve které se šíří zvuk, nazýváme zvukové pole. Jestliže je zdroj zvuku vložen do uzavřeného, dostatečně velkého prostoru vykazujícího dostatečnou míru pohltivosti, rozlišujeme tři základní typy akustických polí:

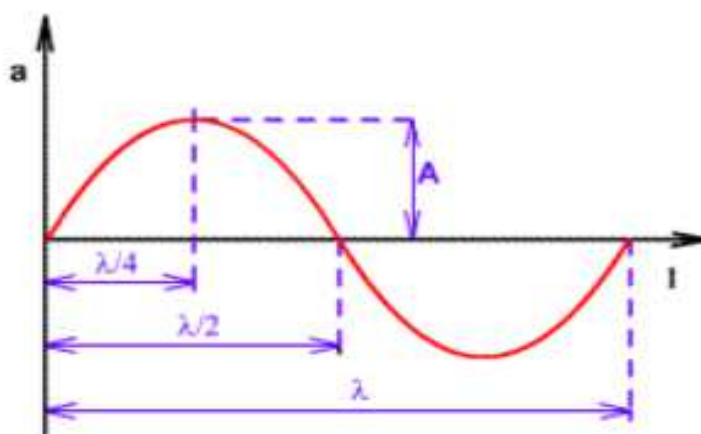
- blízké pole,
- volné pole,
- difuzní pole,

Hranice mezi blízkým a volným akustickým polem je vymezena frekvenčním rozsahem dané úlohy. To znamená, že hranice mezi blízkým a volným polem je ve vzdálenosti čtvrtiny nejnižší vlnové délky z frekvenčního rozsahu. V blízkosti stěn, stropů a překážek vzniká difuzní pole. Pokud stěna není dokonale pohltivá, akustická vlna narazí na stěnu a část energie se odrazí. Odražené vlny se křížují nebo překrývají a nepříznivě ovlivňují měření. Je-li prostor energií zvuku vyplněn rovnoměrně, vzniká dozvukové akustické pole označované jako difuzní akustické pole. Pokud je prostor okolo zdroje hluku malý, volné pole se vůbec nevytvoří a vznikne pouze difuzní pole. [6], [7]



Obr. 4: Akustická pole v uzavřené místnosti

Na obrázku 4 je zobrazen zdroj hluku uprostřed místnosti. Rovněž je na tomto obrázku zobrazen pravoúhlý graf. Na svislé ose je znázorněn akustický tlak v hladinovém vyjádření. Na vodorovné ose je znázorněna vzdálenost od zdroje hluku. Graf je rozdělen na 3 části. První část představuje blízké pole, druhá část volné pole a třetí část difuzní pole. Nacházíme-li se ve volném poli v určité vzdálenosti od zdroje zvuku, vzdálíme-li se o dvojnásobnou vzdálenost od zdroje zvuku a stále se nacházíme ve volném poli, pak hladina akustického tlaku poklesne o 6 [dB].



Obr. 5: Vlnová délka

Zdroj: <https://arduino.cz/uzivatelsky-definovane-funkce-2/>

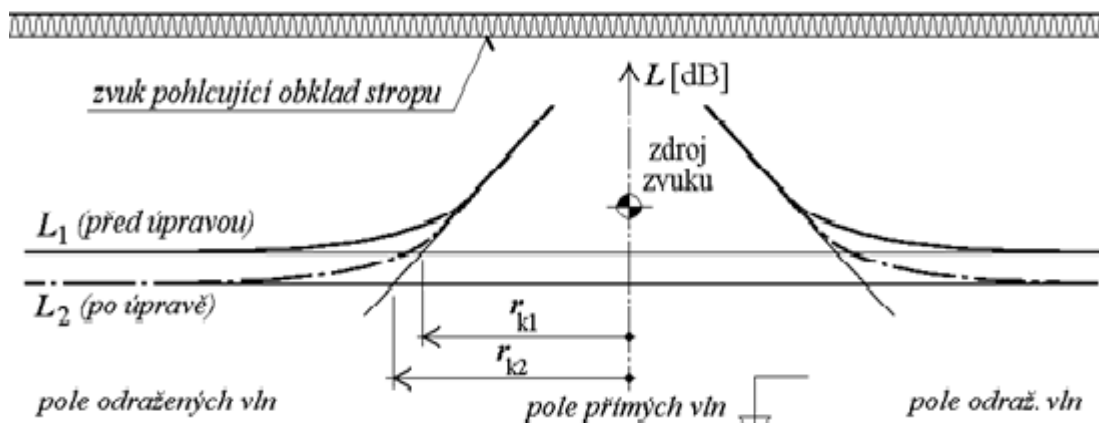
Vlnová délka λ [m] – Určuje vzdálenost dvou nejbližších bodů postupného periodického vlnění, které kmitají ve fázi. Někdy také bývá označována jako délka vlny.

Následující vztah je převzatý z [15]

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\text{m}] \quad (8)$$

kde: c [m/s] – je rychlost šíření vlny prostorem

f [Hz] – frekvence vlnění



Obr. 6: Schéma uzavřeným prostorem místnosti

Zdroj: <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/227-sireni-zvuku-v-uzavrenem-prostoru-difuzni-zvukove-pole>

Obrázek 6 ukazuje schéma řezu uzavřeným prostorem (místností) se zdrojem zvuku uprostřed místnosti. Prostřednictvím pravoúhlého diagramu je znázorněno rozložení hladin akustického tlaku v prostoru. Na vodorovné ose je znázorněna vzdálenost r [m] od zdroje zvuku, na svislé ose je pak znázorněna hladina akustického tlaku L [dB]. Zvýšíme-li pohltivost prostoru, například obložením stropu pohlcujícím obkladem, pak se hladina akustického tlaku L_1 [dB] v poli odražených vln sníží na hodnotu L_2 [dB]. Dozvuková vzdálenost r_{k1} [m] se zároveň zvětší na hodnotu r_{k2} [m]. Z toho pak vyplývá, že zvýšením pohltivosti prostoru nesnížíme hladinu akustického tlaku v bezprostřední blízkosti zdroje, kde se nachází pole přímých vln tedy v poli blízkém a volném.

2.7 Měření hluku:

Měření hluku se provádí za účelem ochrany lidského zdraví nebo ke zlepšení podmínek pro život. Hlukem je označován každý rušivý či obtěžující zvuk. Hluky negativně působí na lidský organismus a člověk může mít pocity podrážděnosti nebo problémy se soustředěním. Hluk v nadměrném množství může způsobit i ztrátu sluchu. Při krátkodobém působení nadměrné úrovně hluku většinou dojde k dočasné ztrátě sluchu.

Z fyzikálního hlediska se člověku významně posune práh slyšení. V opačném případě může při dlouhodobém působení nadměrné úrovně hluku dojít k nevratnému poškození sluchu.

2.7.1 Měření a zpracování akustických veličin

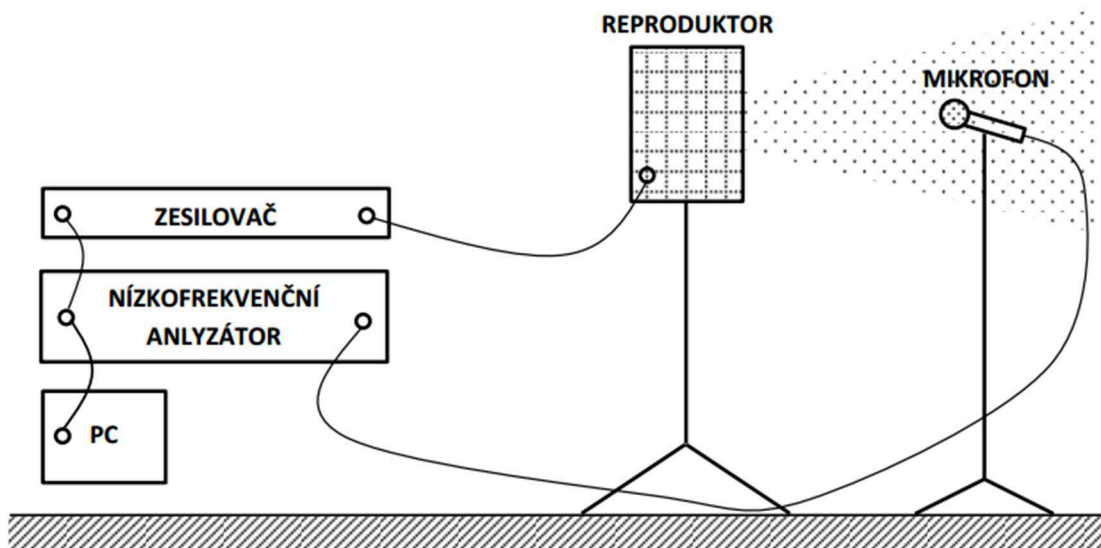
I přesto, že měření každé akustické veličiny může být jiné a probíhat jiným způsobem, tak je možné obecný postup měření a zpracování akustického signálu demonstrovat na příkladu měření akustického tlaku.

- 1.) Technický objekt (zdroj hluku, reproduktor) vydává hluk. Hluk představuje akustický tlak, který působí na čidlo. Čidlo je součástí snímače, na kterém je v reálném čase vyvolána odezva, která je úměrná působení akustického tlaku.
- 2.) Snímač obsahuje také měnič, který mění snímanou akustickou veličinu na hodnotu, kterou jsme schopni dále zpracovávat. Ve většině případů snímač mění akustickou veličinu na hodnotu elektrického napětí U [V].
- 3.) Signál elektrického napětí je veden přes zesilovač, který signál zesílí, na vstup analyzátoru. Zde se signál ošetří sadou filtrů. Zejména se jedná o filtry Hi Pass (HP), Low Pass (LP), Band Pass (BP), Aliasingový filtr, filtry stejnosměrných složek napětí a subsonických kmitočtů atd. Ve většině případů je nastavení filtrů závislé na charakteru analýzy.
- 4.) A) V případě moderního analyzátoru je signál dále vzorkován a následně se převádí do digitální podoby. Výstupem pak jsou předem zvolené analýzy a vykreslení naměřených dat.

B1) V druhém případě jedná-li se o starší analyzátor, je signál stále v analogové podobě. Signál se rozdělí na více částí dle potřeby a následně je signál filtrován oktávovými či třetinooktávovými analogovými filtry. Poté lze ještě signál zpracovávat váhovými filtry a to buď filtrem A, B, C nebo D.

B2) V dalším kroku je signál analogovým/digitálním převodníkem převeden do digitální podoby. Nakonec se provedou předem zvolené analýzy a vykreslí se naměřená data dle potřeby.

Jednoduché měřicí schéma pro měření akustického tlaku je znázorněno na obrázku 7.



Obr. 7: Schéma měřené soustavy

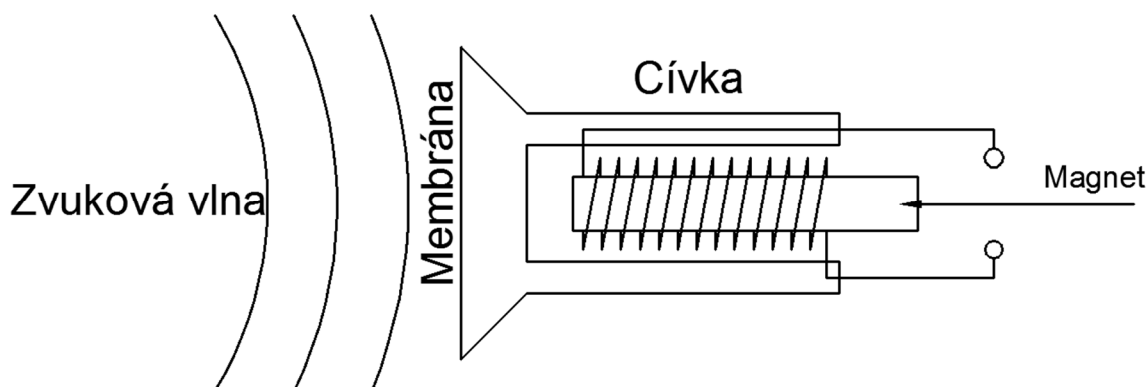
2.8 Elektroakustický měnič - mikrofon:

V následující kapitole budou probrána zařízení, kterými se měří zvuk. Bude popsán princip fungování jednotlivých typů a následně shrnuty výhody a nevýhody.

Akustický tlak se měří zařízením, kterému se říká elektroakustický měnič. Bez ohledu na princip fungování se mu říká mikrofon. Základní rozdělení mikrofonu je na elektrodynamické a kondenzátorové. Rozdíl, mezi těmito typy, je v činnosti čidel jednotlivých typů mikrofonu. [18]

2.8.1 Elektrodynamické mikrofony:

Tento typ mikrofonu se skládá ze speciální pružné membrány, která má na své zadní straně připojenou cívku z vodivého materiálu. Další částí mikrofonu je permanentní magnet s dutinou, kterou prochází cívka. Při změně akustického tlaku se membrána pohybuje a s ní i připojená cívka. Magnetické pole permanentního magnetu působí na cívku, ve které se nutně indukuje elektrické napětí. Velikost elektrického napětí je pak přímo úměrná rychlosti pohybu cívky v magnetickém poli. Na obrázku 8 je schématické znázornění mikrofonu. Tento typ mikrofonu se používá pouze pro orientační měření. Jeho směrová charakteristika je dosti nelineární, zvuk dokáže účinně měřit pouze z přední strany a jeho frekvenční charakteristika je značně nevyrovnaná. [18]



Obr. 8: Schéma elektrodynamického mikrofonu

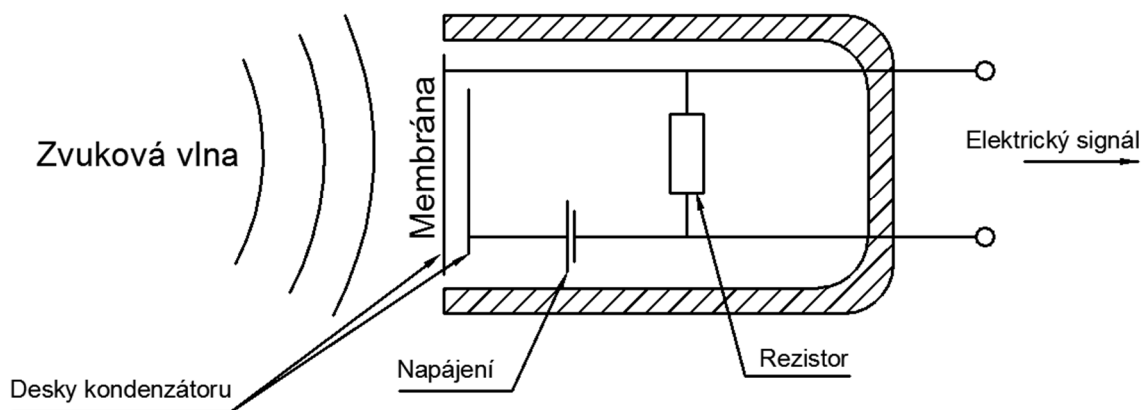


Obr. 9: Elektrodynamický mikrofon

Zdroj: <http://www.dexon.cz/katalog/profesionalni-technika/mikrofony-dratove-nahlavni-a-prislusenstvi/md-110-mikrofon-elektrodynamicky.html>

2.8.2 Kondenzátorové mikrofony:

Tento typ mikrofonu se skládá ze speciální pružné membrány, která je připojena k jedné z desek deskového kondenzátoru. Při pohybu membrány se mění vzdálenost desek kondenzátoru, což nutně vede ke změně kapacity kondenzátoru. Jinými slovy, změna polohy membrány (desky kondenzátoru) se převádí na elektrický signál. Schéma mikrofonu je znázorněno na obrázku 10. Nevýhodou je, že tento typ mikrofonu vyžaduje napájení. Aby kondenzátor fungoval správně, musí být na desky kondenzátoru přivedeno polarizační napětí, a proto je součástí mikrofonní vložky jednoduchý elektrický obvod. Starší typy mikrofonů obsahují vnější zdroj napětí, novější typy mikrofonů obsahují vložku opatřenou speciální směsí, která udrží elektrické napětí. Tyto mikrofony se používají v měřicích zařízeních a oproti elektrodynamickým mikrofonům mají vyrovnanou frekvenční charakteristiku. [18]



Obr. 10: Schéma kondenzátorového mikrofону



Obr. 11: Kondenzátorový mikrofón

Zdroj: <https://imusicdata.cz/audix-adx51-kondenzatorovy-mikrofon>

2.9 Akustický výkon:

Mezi základní veličiny, které charakterizují zdroj zvuku, patří akustický výkon. Akustická energie přenesena prostředím za jednotku času je akustický výkon W [Watt].

Následující vztah je převzatý z [1].

$$W = \frac{dE}{dt} \quad [\text{Watt}] \quad (9)$$

Kde: E [J] – akustická energie vyzářená zdrojem hluku

t [s] – doba přenosu energie

Ve většině případů akustický výkon zaznamenáváme v hladinovém vyjádření buď jako celkovou hladinu nebo v 1/1 – oktávových či 1/3 oktávových pásmech. [19]

$$L_W = 10 \cdot \log\left(\frac{W}{W_0}\right) \quad [\text{dB}] \quad (10)$$

Kde: W [W] – akustický výkon zjištěný měřením

W_0 [W] – referenční hodnota akustického výkonu (1 pW)

Akustický výkon je možné vypočítat ze dvou měřitelných akustických veličin. Proto je možné postup pro určování hladiny akustického výkonu klasifikovat do dvou primárních skupin: [19]

- **určení akustického výkonu z měření akustického tlaku,**
- **určení akustického výkonu z měření akustické intenzity,**

Následující vztah je převzatý z [19].

Kde tato rovnice ukazuje provázanost jednotlivých veličin:

$$W = I \cdot S = p \cdot v \cdot S = \frac{p^2}{z_0} \cdot S \quad [W] \quad (11)$$

Kde: I [W/m^2] – Akustická intenzita

S [m^2] – Plocha

p [dB] – Akustický tlak

v [m/s] – Akustická rychlost

z_0 [$N \cdot s/m^3$] – Měrná akustická impedance

Akustická rychlost v [m/s] je rychlost, s jakou kmitají jednotlivé částice v prostředí, kterým se šíří akustická vlna.

Měrná akustická impedance (akustický vlnový odpor) z_0 [$N \cdot s/m^3$] jinými slovy taky vlnová impedance prostředí, je akustická impedance vztažená k jednotkové ploše. Tato veličina nezávisí na rozměrech a tvaru akustické soustavy, ale je dána vlastnostmi prostředí, ve kterém se soustava nachází.

Akustická vlnová impedance z [$N \cdot s/m^3$] je dána vztahem mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí (jinak nazývána taky jako objemová rychlost).

$$p = z \cdot v \quad [Pa] \quad (12)$$

2.9.1 Určení hladin akustického výkonu z měření akustického tlaku:

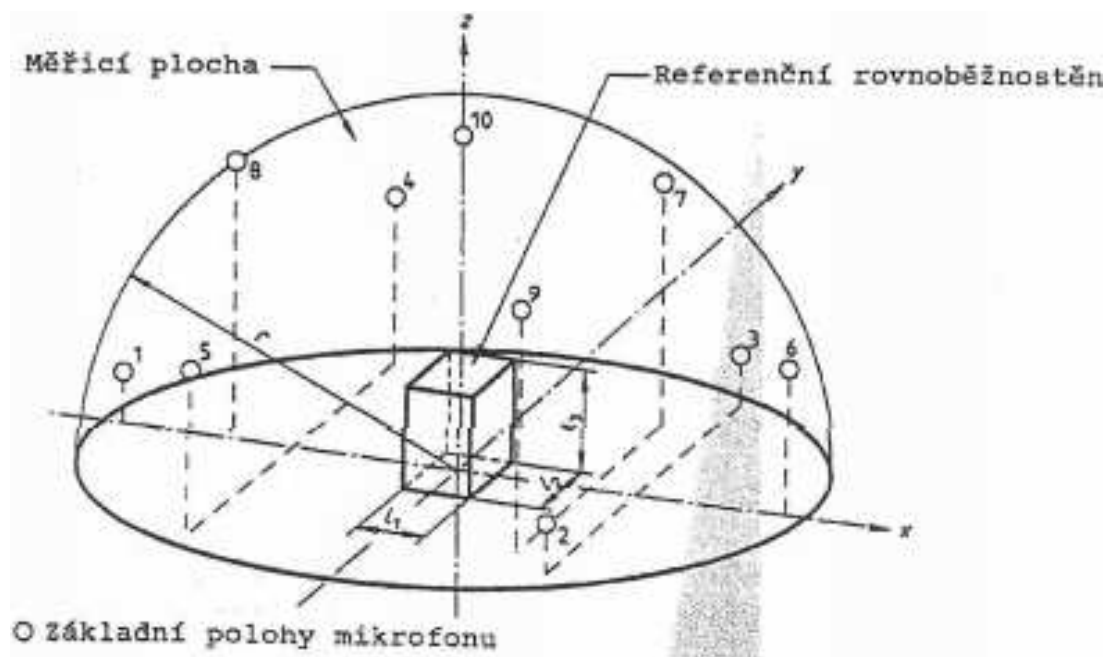
Akustický výkon se dá určit ze dvou měřitelných veličin. V následující kapitole je detailně probráno, jak se určí hladina akustického výkonu z měření akustického tlaku a to proto, že na hemisféře jsou umístěny snímače (mikrofony) pro měření akustického tlaku.

Měření je závislé na prostředí, ve kterém se provádí, a proto se dále podle normy dělí do podskupin. Z nejběžnějších měření, která se provádějí, můžeme uvést tyto:

- Měření dle normy ČSN ISO 3744 – „Technická metoda ve volném poli nad odrazivou rovinou.“ [19]
- Měření dle normy ČSN ISO 3745 – „Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti.“ [19]
- Měření dle normy ČSN ISO 3746 – „Provozní metoda měření ve volném poli nad odrazivou rovinou.“ [19]
- Měření dle normy ČSN ISO 3747 – „Provozní metoda s referenčním zdrojem hluku.“ [19]

Všechny tyto normy, co se metodiky měření týče, jsou si podobné. Liší se však v nárocích na použité přístroje a dosažené přesnosti měření. Měření se provádí v normou předepsaném prostředí (volné pole nad odrazivou rovinou, polobezodrazová místnost, bezodrazová místnost). Pokud se jedná o provozní metodu měření, zdroj hluku se měří na pozici v provozních podmínkách. [19]

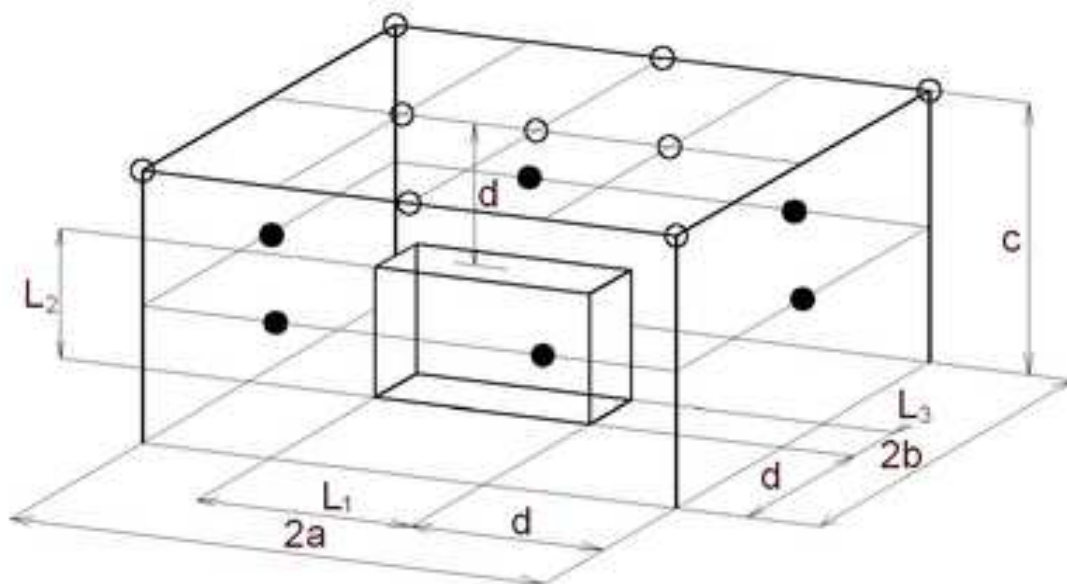
Dle normy je stanovena okolo měřeného objektu měřicí plocha S [m²]. Podle velikosti měřeného objektu, metodě měření a nejnižším sledovaném kmitočtu hlukového spektra je určen tvar a velikost měřicí plochy. [19]



Obr. 12: Schéma měřicí plochy pro přepočet hladiny akustického tlaku na hladinu akustického výkonu – polokoule

Zdroj: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/content/files/5_Mereni-akustickeho-vykonu-tlak.pdf

Na obrázku 12 je zobrazena měřící plocha ve tvaru polokoule. Kvádr nám představuje zdroj hluku a polokoule reprezentuje měřící plochu. Signál vyzářený ze zdroje prochází touto měřící plochou. Kolečka označená čísly reprezentují polohy mikrofónů.



Obr. 13: Schéma měřící plochy pro přepočet hladiny akustického tlaku na hladinu akustického výkonu – rovnoběžnostěn

Zdroj: <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/15222-snizovani-hluku-od-zdroju-tepla-a-sireni-zvuku>

Na obrázku 13 je zobrazen další typ měřící plochy, který má tvar rovnoběžnostěnu. Jsou zobrazeny dva kvádry, malý kvádr představuje zdroj hluku a velký kvádr reprezentuje měřící plochu. Tečky reprezentují polohy mikrofónů.

V dalším kroku je zapotřebí dle normy zvolit nutný počet měřících bodů na měřící ploše. Většinou se volí 8 až 40 měřících bodů. O tom, kolik se zvolí bodů, rozhoduje ustálenost hlukového pole, které se bude měřit. Měření provádíme v oktávových či třetinooktávových pásmech, a to u všech měřících bodů. Autospektra lineárně průměrujeme po dobu stanovenou normou, která je závislá na dolním kmitočtu. [19]

Měření lze provést i za pomoci jediného mikrofónu. Tomuto měření se říká skenování po měřící ploše. Po dobu skenování lineárně průměrujeme získané hladiny v jednotlivých oktávových pásmech. Toto měření se používá na zvláště ustálených hlukových polích. [19]

Aby bylo možno správně posoudit hladinu akustického výkonu zdroje hluku, provádí se měření při těchto režimech: [19]

- „Měření se zpravidla provádí v několika provozních režimech, které vychází z konkrétních požadavků.“ [19]
- „Povinně se však měří vždy nejhluchnější provozní režim zdroje hluku, a dále nejběžnější provozní režim zdroje hluku.“ [19]
- Také se měří hladina akustického tlaku při vypnutém zdroji, aby bylo možné korigovat hluk pozadí. [19]

Je vhodné si předem vytvořit makro, které nám provede následující výpočty. Do připraveného makra načteme hladiny akustických tlaků získané při měření hluku zdroje z jednotlivých bodů. V dalším kroku do makra načteme hodnoty hladin akustických tlaků změřených při měření hluku pozadí. [19]

Poznámka: Po dobu zkoušky se musí měřit, v okolí zdroje hluku, teplota vzduchu, relativní vlhkost a statický tlak (meteorologické podmínky).

Následující vztahy byly převzaty z [19].

Za prvé pro zdroj hluku se stanoví průměrná hladina akustického tlaku L_p' [dB] na měřicí ploše.

$$L_p' = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1 \cdot L_{pi}'} \right] \text{ [dB]} \quad (13)$$

Za druhé pro hluk pozadí se stanoví průměrná hladina akustického tlaku L_p'' [dB].

$$L_p'' = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1 \cdot L_{pi}''} \right] \text{ [dB]} \quad (14)$$

Kde: N – počet bodů zvolených na měřicí ploše

i – číslo bodu na měřicí ploše

V dalším kroku se provede korekce průměrné hladiny akustického tlaku zdroje zvuku na hluk pozadí. Zde se vychází z rozdílu hladiny hluku pozadí a hladiny hluku měřeného zdroje.

$$\Delta L = L_p' - L_p'' \text{ [dB]} \quad (15)$$

Pro použití korekcí musí rozdíl mezi hladinou hluku měřeného zdroje a hladinou hluku pozadí splňovat normou předepsané podmínky.

- „Pro měření ve volném poli nad odrazivou rovinou je minimální odstup hluku pozadí 6 [dB].“ [19]
- Při přesném měření v bezodrazové místnosti musí být odstup mezi těmito hladinami minimálně 10 [dB]. [19]

Následně se vypočte korekční faktor na hluk pozadí $K1$. V případě, že se měří ve volném poli nad odrazivou rovinou, vyhodnocuje se korekční faktor $K2$, který zahrnuje vliv měřicí místnosti (používá se pouze v měření dle normy ČSN ISO 3744). [19]

Korekční faktor $K1$ se pak vypočte ze vztahu:

$$K1 = 10 \cdot \log(1 - 10^{-0,1 \cdot \Delta L}) \quad [\text{dB}] \quad (16)$$

Vypočtená průměrná hladina akustického tlaku na měřicí ploše se koriguje na hluk pozadí dle vztahu:

$$L_{pf} = L_p' - K1 - K2 \quad [\text{dB}] \quad (17)$$

Výsledky v jednotlivých oktávových či třetinooktávových pásmech se prezentují v grafech. [19]

Získané hladiny akustického tlaku v jednotlivých oktávových či třetinooktávových pásmech se následně váží váhovým filtrem A. Poté se provede výpočet celkové hladiny akustického tlaku po měřicí ploše, a to jak pro vážené hladiny, tak pro nevážené hladiny. [19]

$$L_{pf,celk.} = 10 \cdot \log(10^{0,1 \cdot L_{pf,1}} + 10^{0,1 \cdot L_{pf,2}} + \dots + 10^{0,1 \cdot L_{pf,n}}) \quad [\text{dB}] \quad (18)$$

V posledním kroku se provede výpočet hladin akustického výkonu v jednotlivých oktávových, či třetinooktávových pásmech, a to jak pro hladiny vážené, tak nevážené a výpočet celkové hladiny akustického výkonu. [19]

Hladiny akustického výkonu vypočteme z hladin akustických tlaků tímto způsobem:

$$L_w = L_{pf} + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad [\text{dB}] \quad (19)$$

Kde: S – plošný obsah měřicí plochy [m^2]

S_0 - referenční hodnota plošného obsahu měřicí plochy 1 m^2

Prezentace výsledku je stejná jako u hladin akustických tlaků, to znamená grafické výsledky oktavových spekter a hodnoty akustických výkonů pro jednotlivá frekvenční pásma. [19]

Na každém zdroji, jehož používáním vzniká nepříznivý hluk, by měla být uvedena informace o hladině akustického výkonu. Na obrázcích 14 a 15 jsou uvedeny praktické příklady označení hladiny akustického výkonu na strojích vydávajících hluk.



Obr. 14: Označení na stroji

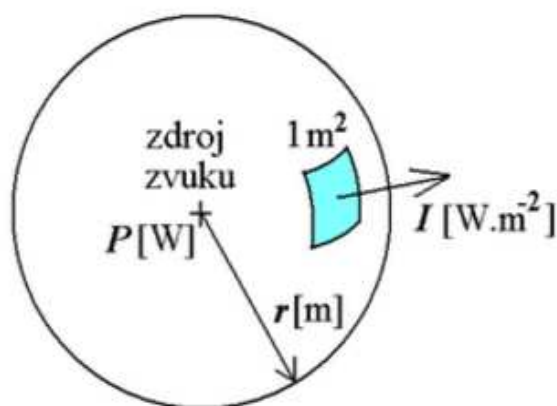


Obr. 15: Označení na stroji

2.9.2 Určení hladin akustického výkonu z měření akustické intenzity:

Již je zřejmé, že akustický výkon se dá určit ze dvou měřitelných veličin. V následující kapitole je probráno určení akustického výkonu z akustické intenzity.

Akustický výkon, emitovaný ze zdroje hluku do prostoru prostřednictvím akustické vlny vztažený na jednotku plochy (vlnoplochy), představuje akustickou intenzitu I [W/m^2].



Obr. 16: Šíření zvuku od bodového zdroje

Zdroj: <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/222-sireni-zvuku-ve-volnem-prostoru-volne-zvukove-pole>

Podstata měření je v zásadě totožná s podstatou měření akustického tlaku. To znamená navrhnout si měřicí plochu a zvolit nutný počet bodů k měření, nebo provést

skenovací měření. Hlavním rozdílem v měření je měřicí čidlo. U tohoto měření se používá sonda akustické intenzity. [20]

Vyhodnocení je pak mnohem rychlejší než u metody měření akustických tlaků, protože hladina akustické intenzity se určí jako součin průměrné hodnoty akustické intenzity na měřicí ploše a velikosti měřicí plochy. [20]

Problémem je pak posouzení korektnosti z hlediska měřicího prostředí, ve kterém se měření provádí. Je zapotřebí vypočítat a brát v ohledu řadu faktorů, jejichž použití specifikuje blíže norma ČSN ISO 9614. [20]

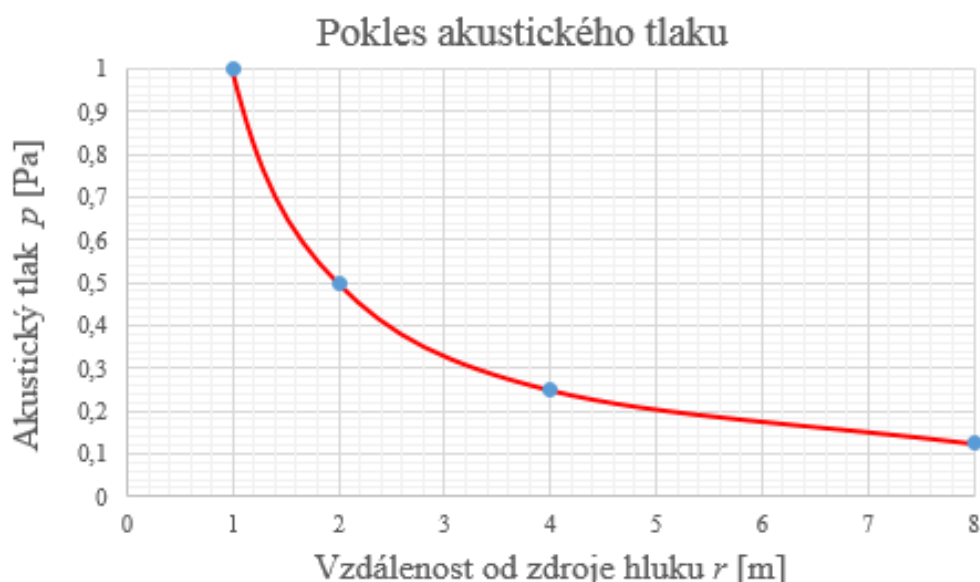
Postupy pro měření akustické intenzity jsou dány v již uvedených normách v kapitole 2.9.1. Co se metodiky týká, jsou postupy obdobné. Liší se však v nárocích na použité přístroje a dosažené přesnosti měření. Měření se provádí v normou předepsaném prostředí (volné pole nad odrazivou rovinou, polobezodrazová místnost, bezodrazová místnost). Pokud se jedná o provozní metodu měření, zdroj hluku se měří na pozici v provozních podmínkách. Dle normy je stanovena okolo měřeného objektu měřicí plocha S [m²]. Podle velikosti měřeného objektu, metodě měření a nejnižším sledovaném kmitočtu hlukového spektra je určen tvar a velikost měřicí plochy. Možné tvary měřicí plochy jsou uvedeny na obrázcích 12 a 13. [19], [20]

Aby bylo možno správně posoudit naměřený akustický výkon zdroje hluku, provádí se měření při těchto podmínkách:

- Zdroj hluku se měří v několika provozních režimech, které vychází z konkrétních požadavků. [20]
- „Povinně se však měří vždy nejhlučnější provozní režim zdroje hluku, a dále nejběžnější provozní režim zdroje hluku.“ [20]

2.10 Shrnutí současného stavu řešení problematiky:

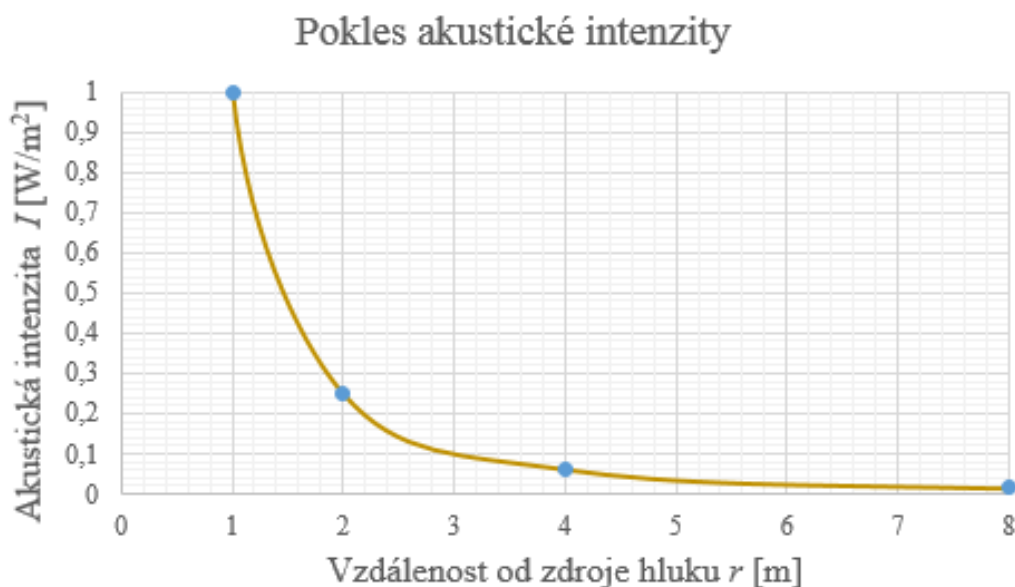
Jednou z nesporných výhod určování hladiny akustického výkonu je, že není závislý na vzdálenosti od zdroje. Jinými slovy akustický výkon ve vzdálenosti jednoho metru bude stejný jako akustický výkon ve vzdálenosti dvou metrů. Při měření akustického tlaku dochází k poklesu akustického tlaku s přibývajícím vzdáleností. Akustický výkon je závislý i na měřicí ploše. S rostoucí vzdáleností roste i velikost měřicí plochy, a proto je akustický výkon konstantní.



Obr. 17: Pokles akustického tlaku

Jak již bylo řečeno, akustický tlak s rostoucí vzdáleností klesá. Obrázek 17 popisuje závislost akustického tlaku na vzdálenosti. Na vodorovné ose je uvedena vzdálenost od zdroje hluku a na svislé ose je uveden akustický tlak. Z obrázku je vidět, že na dvojnásobné vzdálenosti akustický tlak klesl na polovinu své původní hodnoty.

Akustický výkon se také dá určit z měření akustické intenzity. Stejně jako akustický tlak, tak i akustická intenzita klesá s rostoucí vzdáleností od zdroje. Pro určení akustického výkonu z akustické intenzity je zapotřebí znát i velikost myšlené kulové plochy, a proto pokles akustické intenzity s rostoucí vzdáleností musí být přímo úměrný nárůstu této plochy.



Obr. 18: Pokles akustické intenzity

Obrázek 18 ukazuje pokles hladiny akustické intenzity. Na vodorovné ose je zaznamenána vzdálenost od zdroje hluku a na svislé ose je zaznamenána akustická intenzita. Na obrázku je nastíněno, že na dvojnásobné vzdálenosti klesá akustická intenzita na čtvrtinu své původní hodnoty.

V obou případech, jak u poklesu akustické intenzity, tak u poklesu akustického tlaku, pokles na dvojnásobné vzdálenosti představuje snížení hladiny akustického tlaku o 6 [dB]. [16]

V dnešní době se dává přednost určení hladiny akustického výkonu. Hlavním důvodem, ať už se měření provádí jakýmkoliv způsobem je, že akustický výkon není závislý na vzdálenosti od zdroje hluku. Hodnota hladiny akustického výkonu, která se uvádí na zařízeních vydávajících hluk, je směrodatnější a není k této hodnotě potřeba udávat další okolnosti týkající se měření. Pozorovatel neznalý problematiky akustického měření může lépe porovnat či posoudit uvedenou hodnotu na přístroji.

Hodnota hladiny akustického výkonu L_w se udává v [dB]. Referenční hodnota akustického výkonu $W_0 = 10^{-12}$ [W] se porovnává s aktuální naměřenou hodnotou vydanou ze zdroje hluku. Akustický výkon se měří na zvolené ploše a není závislý na směru vyzařování hluku ze zdroje. Výsledná hodnota emitovaného akustického výkonu není závislá na odrazivosti okolí.

3. Rozbor metody měření dle normy ČSN ISO 3745:

Tato norma specifikuje metodu měření pro určení hladiny akustického výkonu a hladiny akustické energie zdroje hluku pomocí akustického tlaku. Je určena pro přesné měření, které se provádí v bezodrazové nebo v polobezodrazové místnosti.

3.1 Zdroje a typy hluku:

Zdroj hluku může být součást, zařízení, nebo podsestava vyzařující hluk. Maximální velikost zdroje hluku se odvíjí od velikosti poloměru koule či polokoule, obklopující zdroj hluku, používané jako měřicí plocha. Tato norma říká, že typ hluku může být: [12]

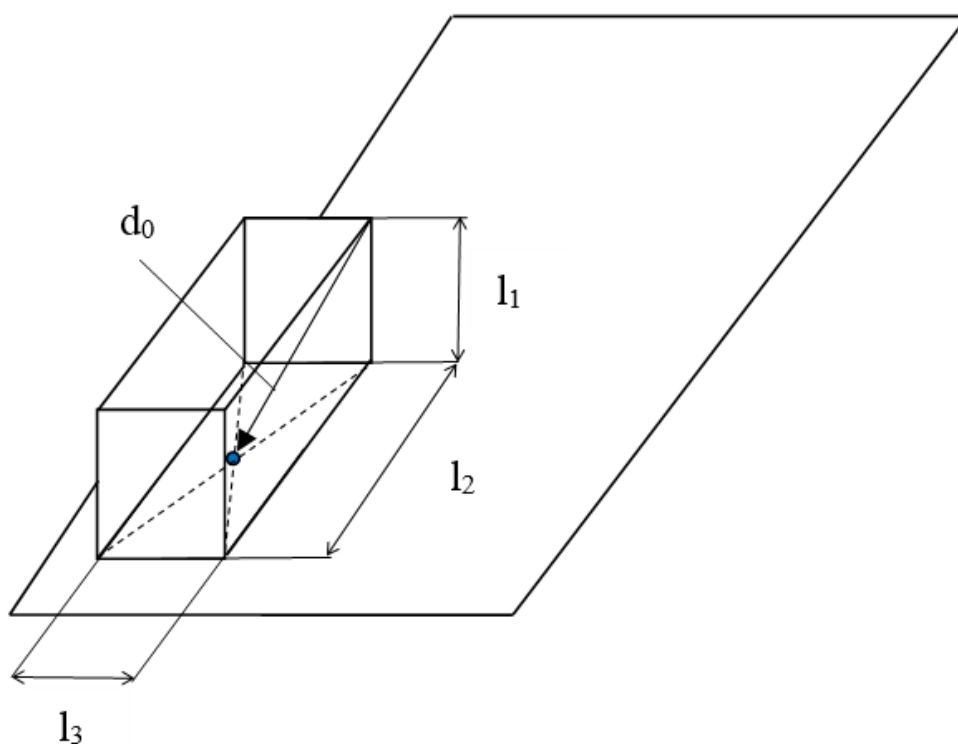
- stacionární, zdroj zvuku se nehýbe (nemění svou polohu),
- nestacionární, zdroj zvuku se pohybuje (mobilní zdroj hluku),
- kolísající,
- nebo jiný případ,

3.2 Měřicí plocha dle normy ČSN ISO 3745

Norma předepisuje kulovou měřicí plochu pro bezodrazové místnosti nebo polokulovou měřicí plochu pro polobezodrazové místnosti. Polokulová měřicí plocha musí mít střed na podlaze v místě, který je vertikálně pod akustickým středem zkoušeného zdroje hluku. [12]

Poloměr r měřicí plochy musí splňovat následující podmínky:

- Poloměr r musí být větší nebo roven jednomu metru. [12]
- Poloměr r musí být větší nebo roven $\frac{1}{4}$ vlnové délky zvuku ($\lambda/4$) na nejnižší sledované frekvenci. [12]
- Poloměr r musí být větší nebo roven dvojnásobku charakteristického rozměru d_0 zkoušeného zdroje nebo musí být větší nebo roven trojnásobku vzdálenosti mezi akustickým středem zdroje a podlahou h_0 . Záleží, který z těchto parametrů je větší. [12]



Obr. 19: Zkoušený zdroj hluku – charakteristický rozměr

Na obrázku 19 je okótovaný zdroj zvuku pro polobezodrazovou místnost s charakteristickým rozměrem d_0 , který se vypočte dle následujícího vztahu:

Následující vztah je převzatý z [12].

$$d_0 = \sqrt{\left(\frac{l_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_2}{2}\right)^2 + l_3^2} \text{ [mm]} \quad (20)$$

Kde: l_1 , l_2 , l_3 jsou rozměry zdroje zvuku

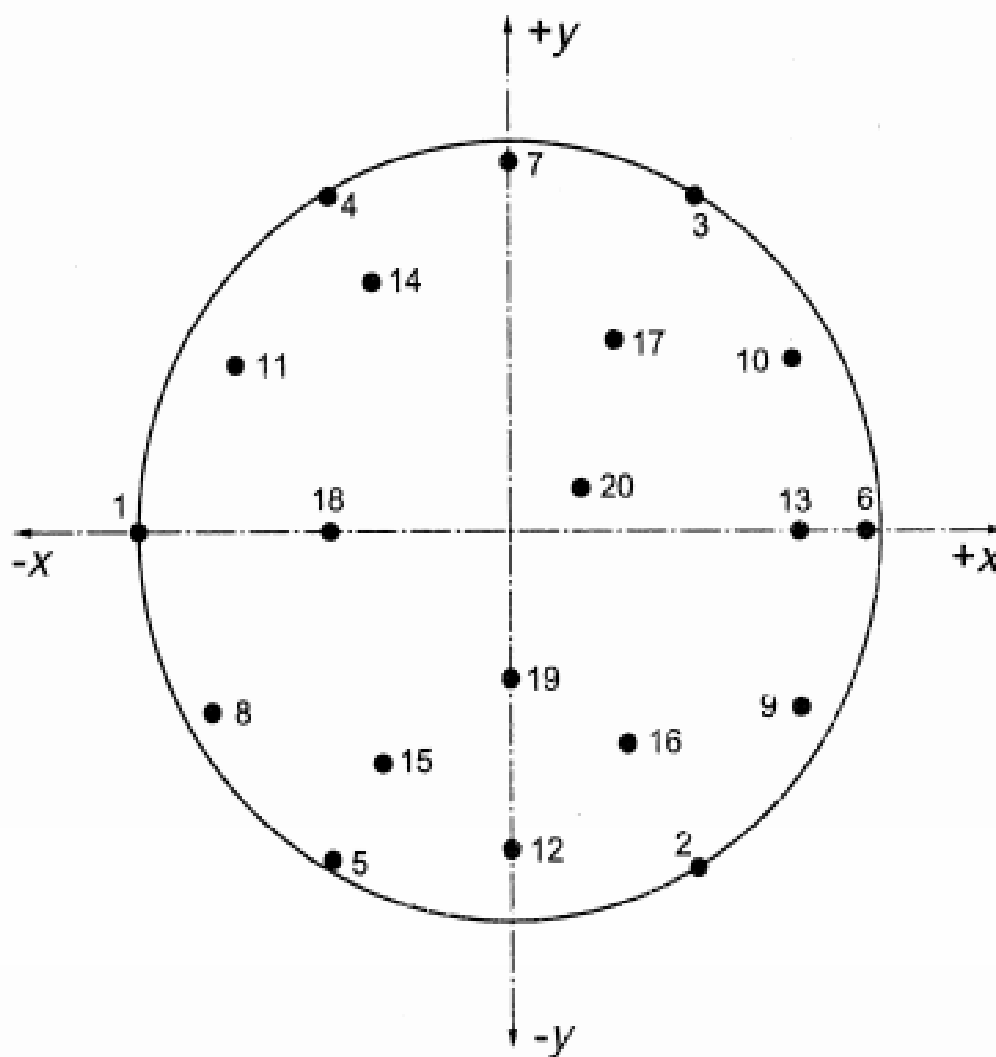
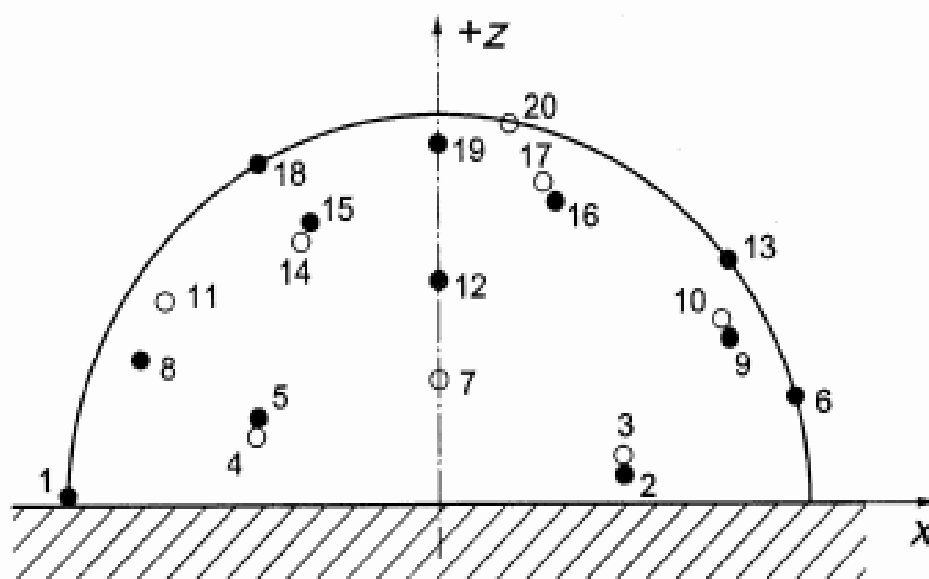
Poznámka: Je dovoleno u malých zdrojů s nízkým hlukem, které se měří v omezeném frekvenčním rozsahu, zvolit měřicí poloměr r menší než jeden metr, nikoliv však menší než půl metru. [12]

Dle normy ČSN ISO 3745 je předepsáno pro měření 20 poloh mikrofonů. Mikrofony následně musí být očíslovány od 1 do 20. Je-li však rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hladinou akustického tlaku nižší než polovina počtu poloh mikrofonů, a to ve všech sledovaných frekvenčních pásmech, je zapotřebí počet mikrofonů upravit. [12]

Doba měření pro měření hladin akustických tlaků: Jde-li o frekvenční pásma se střední frekvencí 160 Hz nebo nižší, doba měření musí být minimálně 30 s. Jde-li o frekvenční pásma se střední frekvencí 200 Hz nebo vyšší, doba měření musí být minimálně 10 s. [12]

3.2.1 Rozložení mikrofonů:

Dle normy ČSN ISO 3745 jsou mikrofony umístěny v předepsaných pozicích. Tabulka 5 předepisuje přesné pozice mikrofonů v souřadném systému, který se nachází ve středu hemisféry. Na obrázku 20 je zobrazena měřicí plocha tvaru polokoule s vyznačenými měřicími body. Plně vybarvené kroužky představují polohy mikrofonů na přilehlé straně a kroužky bez výplně představují polohy mikrofonů na odlehlé straně. [12]



Obr. 20: Polohy mikrofónů na polokulové měřicí ploše (obecný případ)

Číslo pozice mikrofonu	x/r	y/r	z/r
1	-1	0	0,025
2	0,499	-0,864	0,075
3	0,496	0,859	0,125
4	-0,492	0,853	0,175
5	-0,487	-0,844	0,225
6	0,961	0	0,275
7	0	0,947	0,320
8	-0,803	-0,464	0,375
9	0,784	-0,453	0,425
10	0,762	0,440	0,475
11	-0,737	0,426	0,525
12	0	-0,818	0,575
13	0,781	0	0,625
14	-0,369	0,639	0,675
15	-0,344	-0,596	0,725
16	0,316	-0,547	0,775
17	0,283	0,489	0,825
18	-0,484	0	0,875
19	0	-0,380	0,925
20	0,192	0,111	0,975

Tab. 5: Normou předepsané polohy mikrofonů

4. Praktická část

V následující praktické části je popsán technický návrh hemisféry, matematický model hemisféry a nakonec je zde provedeno verifikační měření pro zhodnocení správné funkce celého měřicího systému. Jsou zde popsány jednotlivé části, ze kterých se hemisféra skládá, poté je zde popsán základní postup vyhodnocení získaných dat a nakonec jsou detailně probrány okolnosti měření a zařízení, které jsou při měření použity.

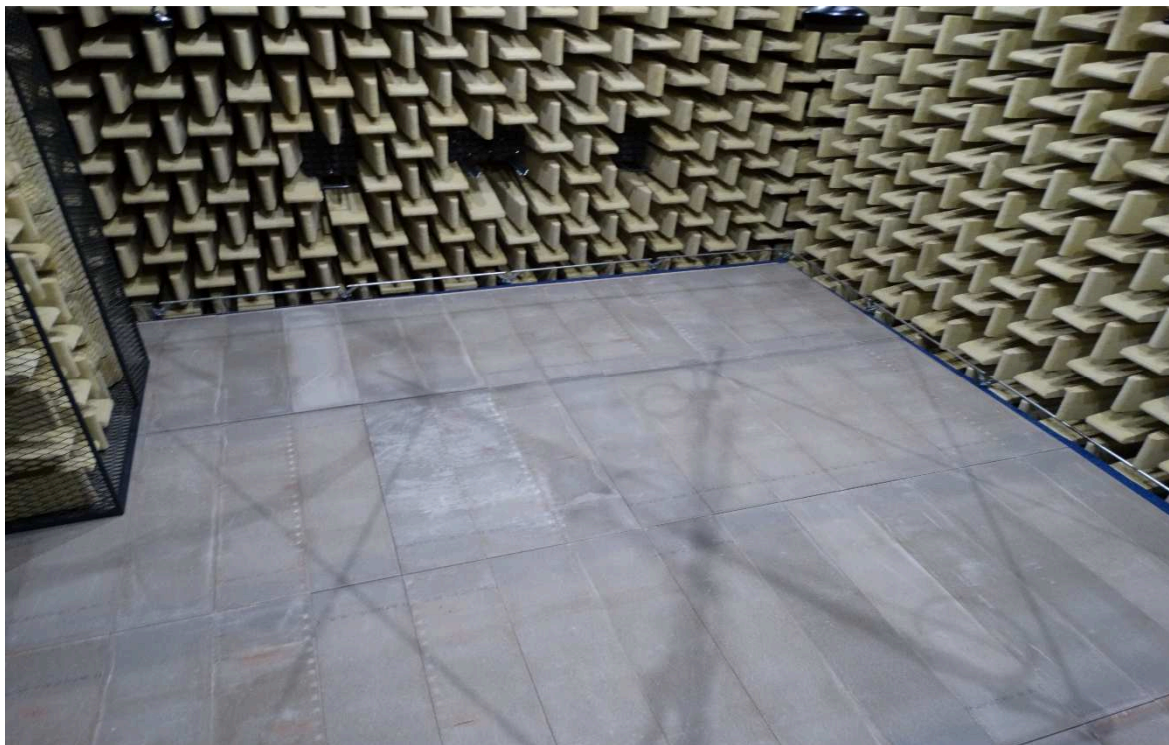
4.1 Návrh měřicí plochy vyhovující potřebám společnosti Honeywell:

Jak již bylo zmíněno, společnost Honeywell vlastní bezodrazovou místnost, kterou jim v loňském roce dodala VŠB – TU Ostrava. Norma ČSN ISO 3745 specifikuje metodu měření pro získání hladiny akustického výkonu pomocí akustického tlaku. Dle této normy se v bezodrazové místnosti vyhodnocuje hladina akustického výkonu zdroje hluku na kulové měřicí ploše. Společnost Honeywell si nechala do bezodrazové místnosti vyrobit reflexní zvukovou podlahu.



Obr. 21: Fotka – bezodrazová místnost

Na obrázku 21 je vidět bezodrazová místnost s průzvučnou pochozí podlahou, kterou tvoří speciální rošty. Rošty jsou dostatečně vzdušné na to, aby nemohlo dojít k odrazu hluku od podlahy v pracovním frekvenčním rozsahu místnosti (50 - 100 000 Hz). Na obrázku 22 je vidět místnost s reflexní zvukovou podlahou, tudíž se z místnosti stala polobezodrazová místnost. Dle normy ČSN ISO 3745 se v polobezodrazové místnosti měří pomocí polokulové měřicí plochy. Podlahu tvoří desky s betonovým povrchem a podlaha je rozebíratelná.



Obr. 22: Fotka - polobezodrazová místnost

4.1.1 Požadavky společnosti Honeywell:

1. Vyrobit Hemisféru co možná největší, tak aby ji bylo možno umístit do bezodrazové místnosti.
2. Provádět měření, kdy frekvenční spektrum bude mít rozmezí od 50 Hz do 20 000 Hz.

První požadavek je limitován velikostí vnitřního prostoru bezodrazové místnosti. Hemisféra musí být velká tak, aby se dala kolem ní v bezodrazové místnosti volně pohybovat. Vnitřní prostor místnosti má rozměry 5 x 5 x 3 [m] (délka, šířka, výška). Druhý požadavek souvisí s velikostí jednotlivých prvků, ze kterých je hemisféra složena. To znamená, že pruty, ze kterých je hemisféra složena, nesměly mít větší průměr než 17 mm. Tato hodnota byla vypočítána ze vztahu (21):

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{346}{20\,000} = 0,0173\,m = 17,3\,mm \cong 17mm \quad (21)$$

Kdy rychlost zvuku při teplotě 25 °C je 346 m/s. [10]

Tento vztah lze vysvětlit tak, že při frekvenci 20 000 Hz a rychlosti šíření vlny prostorem 346 m/s, je vlnová délka velká 17 mm. Ze vztahu pak vyplývá, že s rostoucí frekvencí klesá velikost vlnové délky. Při vyšších frekvencích (nad 20 000 Hz) vlna není schopna překročit (přeskočit) překážku širokou 17 mm a tudíž by se vlna od překážky odrazila. V blízkosti překážek pak mohou vznikat záněje či stojaté vlnění a docházelo by k nepřesnostem měření.

4.1.2 Průzkum trhu:

Na internetu je dostupná firma, která nabízí hemisféry pro měření akustického tlaku. Tato firma pocházející z Dánska se nazývá G.R.A.S. Sound and Vibration. [11]



Obr. 23: Hemisféra od firmy G.R.A.S.
Zdroj: <http://www.gras.dk/67ha-lemo.html>

Na tuto hemisféru může být umístěno 4, 10 nebo 20 mikrofonů. Firma G.R.A.S. nabízí hemisféry v různých velikostech a jsou plně vybaveny. Na obrázku 23 je uvedený model G.R.A.S. 67HA 1m Lemo Hemisphere Kit. Uvedený model má výšku 1283 mm a úhlopříčku 2716 mm. Frekvenční rozsah tohoto modelu je od 3,15 Hz do 20 000 Hz. [11]

4.2 Technický návrh hemisféry pro měření akustických výkonů:

Hemisféra je stojan, ve kterém jsou pevně uchyceny mikrofony. Tyto mikrofony vytváří ohraničující plochu, která má v tomto případě tvar polokoule. Polokoule ohraničuje určitý prostor, ve kterém se nachází zdroj hluku. Tvar hemisféry (polokoule) vychází z tvaru měřicí plochy.

Základní myšlenkou je, aby prvky modelu byly maximálně štíhlé a celý model působil vzdušně. Návrh modelu pak vychází ze zkušeností a nejsou zde provedeny pevnostní analýzy. Jednotlivé prvky mají na sobě přichyceno břemeno zanedbatelné hmotnosti. Minimální tloušťka jednotlivých prvků je pak odhadnuta ze zkušeností. Maximální tloušťka jednotlivých prvků je pak omezena horní hranicí frekvenčního rozsahu bezodrazové místnosti. Výhodou je, že model je rozebíratelný.

Součástí hemisféry je i zvedací zařízení. Toto zařízení slouží k tomu, aby se hemisféra dala rychle uklidit a nemusela být přitom rozebrána. Výstupem zařízení je klika, se kterou když se otáčí, tak se hemisféra zvedá ke stropu pomocí provazu. Toto zařízení nebude detailněji popisováno, protože není tématem této diplomové práce.

4.2.1 Komponenty hemisféry:

Model je vyroben z částečně skružených prutů a výpalků. Aby se zvuk od prutu neodrážel, nesmí být průměr průřezu prutu větší než 17 mm. Průměr prutů tedy je 12 mm. Pruty jsou vyrobeny z konstrukční oceli S235. Na obrázku 24 je znázorněna část skruženého prutu na jehož konci je oploštění, ve kterém je díra. Díra tam je z důvodu spojení prutu s ostatními díly hemisféry.



Obr. 24: Skružený prut s oploštěním na konci

Mezi jednotlivými pruty jsou spojky. Tloušťka těchto spojek opět nesměla překročit hodnotu 17 mm. Tyto spojky jsou výpalky z materiálu S235 a jsou znázorněny na obrázku 25 a 26. Mezi pruty a spojkami jsou šroubové spoje.



Obr. 25: Spojka 1 – pro spojení prutů



Obr. 26: Spojka 2 – pro spojení prutů

V horní části modelu je výpalek tvaru hvězdy, který spojuje šest prutů. Tloušťka hvězdy opět nepřesahuje hodnotu 17 mm. Ve hvězdě jsou vypáleny drážky a otvory, a to proto, aby se zvuk mohl od zdroje volně šířit a neodrážel se od hvězdy.



Obr. 27: Spojka tvaru hvězdy

Na stojaté pruty modelu jsou přichyceny takzvané kleštiny, kterými prochází přímé pruty, na jejichž konci jsou uchyceny mikrofony. Kleštiny jsou vyrobeny z duralu což je slitina hliníku.



Obr. 28: Kleština

Pro uchycení mikrofonu byl použitý držák, který je vidět na obrázku 29. Součástí držáku je bronzová matice se závitem, k němuž je přichycena tyč s kleštinou na konci. Celé je to pak přichyceno k hemisféře.



Obr. 29: Držák na mikrofon

Na obrázku 30 pak je vidět sestava držáku, kleštiny spojovací tyče a mikrofonu. Sestava je přichycena k hemisféře.

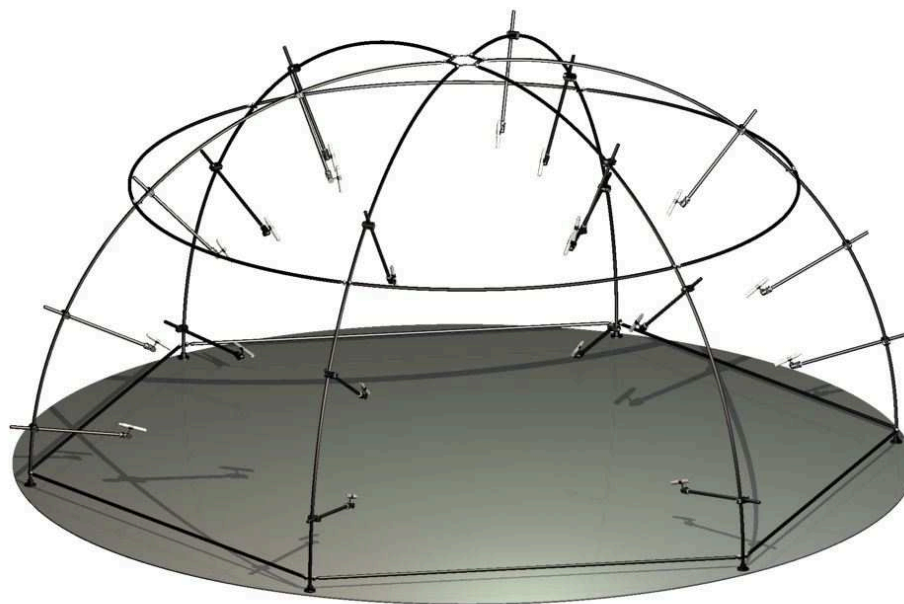


Obr. 30: Sestava mikrofonu, spojovací tyče, držáku a kleštiny

Všechny prvky, ze kterých se skládá model, byly povrchově upraveny. Byl proveden nástřik zbraňovým zinkem. Obrázek 31 ukazuje již hotový model hemisféry.

Technické parametry hemisféry:

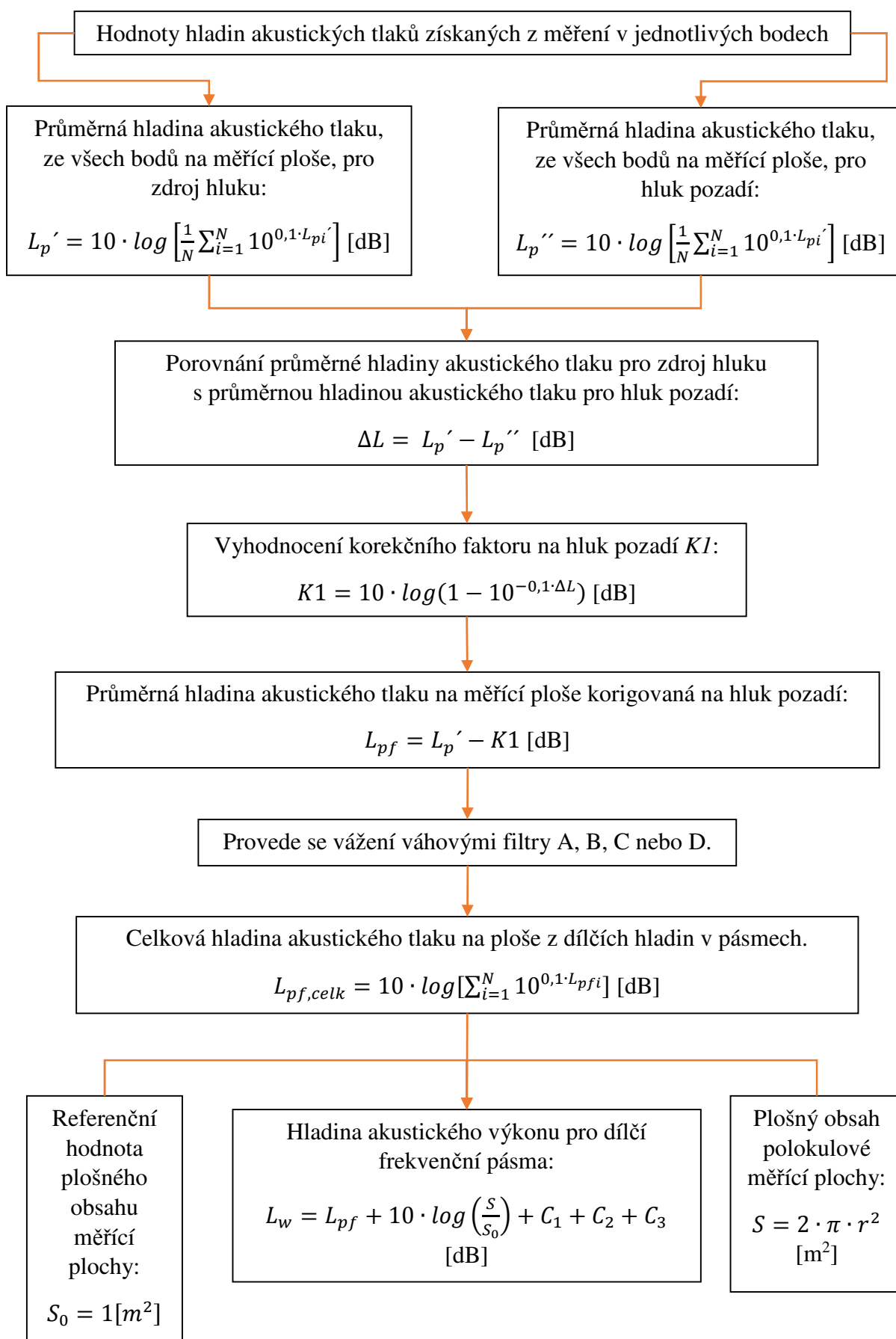
- Hmotnost: 39,5 [kg]
- Vnější průměr: 3080 [mm]
- Výška: 1448 [mm]



Obr. 31: Model hemisféry

4.3 Návrh matematického modelu pro výpočet hladiny akustického výkonu:

Matematickým modelem se rozumí postup výpočtu. Postup pro získání hladiny akustického výkonu L_w [dB] je uveden ve vývojovém diagramu na obrázku 32.



Obr. 32: Vývojový diagram – Postup výpočtu

4.3.1 Korekce na hluk pozadí:

V následující kapitole je vysvětleno jak při měření hladiny akustického tlaku v bezodrazové místnosti správně korigovat akustický signál vycházející ze zdroje hluku na hluk pozadí. Korekce na hluk pozadí je přesně stanovená normou ČSN ISO 3745.

- Je-li $\Delta L \geq 15 [dB]$ $K1$ se rovná 0. [12]
- Je-li $6 [dB] \leq \Delta L < 15 [dB]$ pro třetinooktávová pásma se středními frekvencemi 200 Hz a nižšími a 6 300 Hz, se $K1$ vypočítá dle rovnice uvedeně ve vývojovém diagramu na obrázku 32. [12]
- Je-li $10 [dB] \leq \Delta L < 15 [dB]$ pro třetinooktávová pásma se středními frekvencemi od 250 Hz do 5 000 Hz, se $K1$ vypočítá dle rovnice uvedeně ve vývojovém diagramu na obrázku 32. [12]
- „Pokud $\Delta L < 6 [dB]$ pro jedno nebo více třetinooktávových pásem se střední frekvencí 200 Hz a nižšími frekvencemi a se střední frekvencí 6 300 Hz a vyššími frekvencemi, je třeba za $K1$ dosadit 1,26 [dB] (hodnota pro $\Delta L = 6 [dB]$).“ [12] Ve výsledném protokolu o zkoušce a stejně tak ve výsledných grafech či tabulkách se pak musí jasně uvést, že data v těchto pásmech představují horní meze hladiny akustického výkonu zkoušeného zdroje hluku. [12]
- „Pokud je $\Delta L < 10 [dB]$ pro jedno nebo více třetinooktávových pásem se středními frekvencemi od 250 Hz do 5 000 Hz je třeba za $K1$ dosadit 0,46 dB (hodnota pro $\Delta L = 10 [dB]$).“ [12] V tomto případě se stejně jak u předešlého případu musí uvést ve výsledném protokolu o zkoušce či ve výsledných grafech nebo tabulkách, že data v těchto pásmech představují horní meze hladiny akustického výkonu zkoušeného zdroje hluku. [12]

4.3.2 Korekční faktory C_1 , C_2 , a C_3 :

Vztahy v této kapitole jsou převzaty z [12].

C_1 – Korekce na výchozí veličiny [dB], která bere v úvahu rozdíly mezi výchozími hodnotami použitými k výpočtu hladiny akustického tlaku a hladiny akustického výkonu, a je funkcí změny akustické impedance vzduchu v době a v místě měření. [12]

$$C_1 = -10 \log \frac{p_s}{p_{s,0}} + 5 \log \left[\frac{(273 + \theta)}{\theta_0} \right] [dB] \quad (22)$$

C_2 – Korekce na akustickou vyzařovací impedanci [dB]. Tato korekce převádí aktuální akustický výkon získaný za meteorologických podmínek při měření na akustický výkon získaný při referenčních meteorologických podmínkách. Hodnota korekce C_2 se musí získat z příslušného zkušební předpisu pro hluk, pokud však neexistuje zkušební předpis pro hluk, je následující rovnice platná pro zdroj typu monopól a pro další zdroje je střední hodnotou. [12]

$$C_2 = -10 \log \frac{p_s}{p_{s,0}} + 15 \log \left[\frac{(273 + \theta)}{\theta_1} \right] \text{ [dB]} \quad (23)$$

C_3 – „Korekce na pohltivost vzduchu, v decibelech, na specifických frekvencích.“ [12]

$$C_3 = A_0 \cdot (1,0053 - 0,0012A_0)^{1,6} \text{ [dB]} \quad (24)$$

Kde: p_0 [MPa] ... referenční akustický tlak

p_s [kPa] ... statický tlak v místě a době zkoušky

$p_{s,0}$ [kPa] ... referenční statický tlak

θ [°C] ... teplota vzduchu v době a místě zkoušky

$\theta_0 = 314 \text{ K}$, ... teplota, když je statický tlak roven $p_{s,0}$

$\theta_1 = 296 \text{ K}$

A_0 ... číselná hodnota $\alpha(f)r$

$\alpha(f)$... součinitel útlumu

r ... měřicí poloměr

4.4 Verifikační měření hladiny akustického výkonu:

V následujícím verifikačním měření je ověřeno, zda hemisféra funguje správně. Měření se provádělo v Brně ve společnosti Honeywell, která vlastní bezodrazovou místnost.

4.4.1 Popis měření:

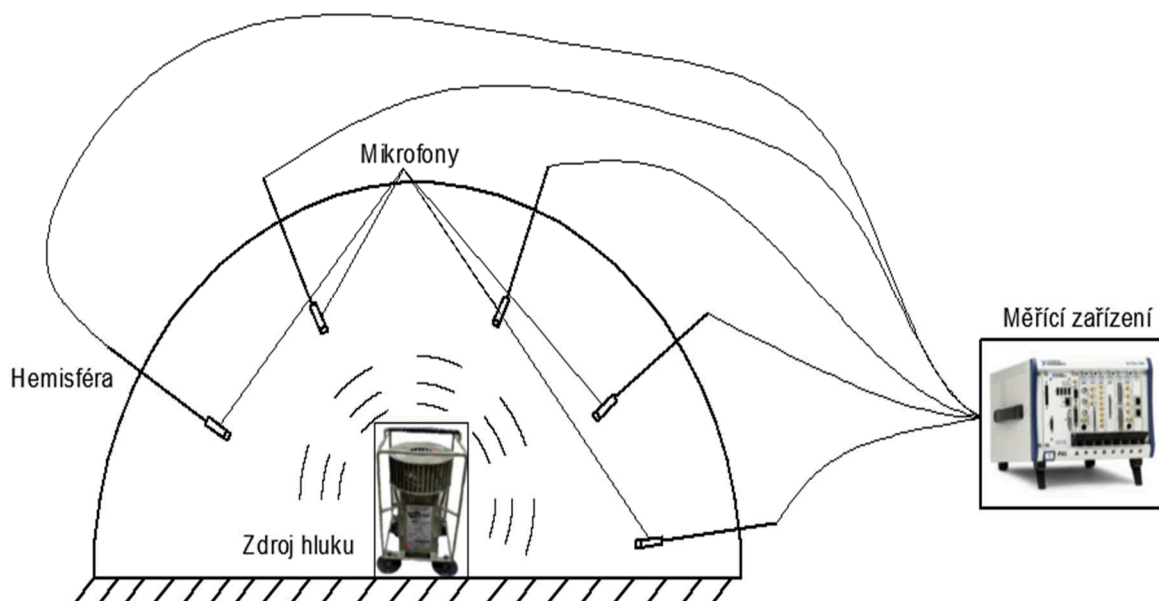
Pro účely měření byla v bezodrazové místnosti poskládána reflexní zvuková podlaha. Díky této reflexní zvukové podlaze lze v bezodrazové místnosti provádět měření jako v polobezodrazové místnosti. Následně byla provedena příprava na měření. Jako zdroj hluku byl použit referenční zdroj zvuku (ventilátor). U tohoto zdroje zvuku jsou dány hodnoty hladin akustického výkonu v jednotlivých třetinooktávových pásmech. Zdroj

zvuku byl umístěn do středu hemisféry a byla provedena celkem dvě měření. Nejprve bylo provedeno měření pro hluk pozadí (vypnutý ventilátor). Poté bylo provedeno měření, při kterém byl zdroj hluku zapnutý. Postupně tak proběhla dvě měření o délce 30 s.



Obr. 33: Fotografie z měření

4.4.2 Schéma měření:



Obr. 34: Schéma měření

4.4.3 Použité přístroje:

4.4.3.1 Mikrofon:

Pro měření bylo použito 20 kondenzátorových mikrofonů. Princip funkce tohoto typu mikrofonu je detailněji probrán v kapitole 2.8.2. Výrobce tohoto typu mikrofonu je firma G.R.A.S. a jeho přesné označení je následující: G.R.A.S. 26CA – Type 46AE TEDS. Mikrofon měří s přesností ± 2 [dB] ve frekvenčním rozsahu 3,15 – 20 000 [Hz]. [14]



Obr. 35: Mikrofon použitý při měření

4.4.3.2 Měřicí zařízení: National Instruments NI PXIe – 1082

Měřicí zařízení se skládá z:

Měřicí karty – National Instruments NI PXIe – 4464 DSA Analog input – 5 kusů

Procesor – National Instruments NI PXIe – 8840 Embedded Controller



Obr. 36: Měřicí zařízení

4.4.3.3 Zdroj hluku:

Jako referenční zdroj hluku byl použit ventilátor, který je vidět na obrázku 37. Ventilátor váží 13 kg a jeho součástí je motor, který je napájen střídavým napětím. Tento ventilátor slouží pro měřicí účely zvláště pro kalibraci jiných zařízení, která se používají při akustických měřeních. U tohoto ventilátoru jsou známy hodnoty hladin akustického výkonu vyzařovaného hluku na jednotlivých frekvencích.

Parametry zdroje hluku:

- Model – R.S.S. – 300
- Sériové číslo: 0599 – 337
- Akustický výkon: 90 [dBA]
- Zdroj střídavého napětí: 208 – 230 [V]
- Frekvence: 50 [Hz]



Obr. 37: Zdroj hluku – ventilátor

1/3 oktavová pásma		Celá – oktavová pásma	
Střední hodnota [Hz]	Hladina akustického výkonu [dB]	Střední hodnota [Hz]	Hladina akustického výkonu [dB]
12,5	62	16	67
16	62		
20	63		
25	68	31,5	76
31,5	73		
40	73		
50	72,7	63	79,3
63	74,5		
80	75,8		
100	76,3	125	81,3
125	76,5		
160	76,8		
200	76,7	250	81,4
250	76,6		
315	76,5		
400	76,6	500	81,4
500	76,7		
630	76,6		
800	78,0	1 000	84,3
1 000	79,9		
1 250	80,3		
1 600	80,3	2 000	84,1
2 000	79,2		
2 500	78,1		
3 150	77,5	4 000	81,8
4 000	77		
5 000	76,5		
6 300	75,5	8 000	78,7
8 000	74,0		
10 000	71,4		
12 500	69	16 000	72
16 000	66		
20 000	64		

Tab. 6: Hodnoty hluku – referenčního zdroje

Celková hladina akustického výkonu referenčního zdroje hluku, vážená váhovým filtrem A, je výrobcem deklarována na 89,8 [dBA].

Nejistota měření ventilátoru:

- od 12,5 Hz – 80 Hz ± 2 [dB],
- od 100 Hz – 3 150 Hz $\pm 0,8$ [dB],
- od 4 000 Hz – 10 000 Hz $\pm 1,5$ [dB],
- od 12 500 Hz – 20 000 Hz ± 2 [dB].

4.4.4 Nastavení hemisféry:

Při měření bylo použito 20 mikrofónů, které ohraničovaly polokulovou měřicí plochu s poloměrem $r = 1200$ [mm]. Polohy jednotlivých mikrofónů jsou uvedeny v následující tabulce.

Číslo pozice mikrofónu	X1 [mm]	Y1 [mm]	Z1 [mm]
1	-1200	0	30
2	599	-1037	90
3	595	1031	150
4	-590	1024	210
5	-584	-1013	270
6	1153	0	330
7	0	1136	384
8	-964	-557	450
9	941	-544	510
10	914	528	570
11	-884	511	630
12	0	-982	690
13	937	0	750
14	-443	767	810
15	-413	-715	870
16	379	-656	930
17	340	587	990
18	-581	0	1050
19	0	-456	1110
20	230	133	1170

Tab. 7: Pozice mikrofónu – vzhledem ke středu hemisféry

4.4.5 Výsledky měření:

V tabulce 8 jsou uvedeny výsledky měření a to jak pro hluk pozadí, tak pro hluk při zapnutém referenčním zdroji. Měření bylo provedeno ve frekvenčním rozsahu od 20 – 20 000 Hz. Na naměřené hodnoty byl použit váhový filtr A.

Střední frekvence [Hz]	Akustický výkon (zapnutý zdroj) [dBA]	Hluk pozadí [dBA]	Střední frekvence [Hz]	Akustický výkon (zapnutý zdroj) [dBA]	Hluk pozadí [dBA]
20	27,3	-9	630	74,3	7,3
25	32,8	-9,5	800	76,9	9,1
31,5	40,1	-6	1000	79,7	10,6
40	42,6	-4,3	1250	80,2	11,9
50	46,6	-4	1600	81,1	13,1
63	50,8	-5,3	2000	79,4	14,1
80	54,8	-7	2500	78,2	14,9
100	57,7	-6,3	3150	77,4	15,6
125	60,1	-4,7	4000	77,4	16
160	63,2	-4,1	5000	76,7	16
200	65,4	-2,6	6300	74,9	15,6
250	67,2	-0,6	8000	72,3	14,7
315	69	1,3	10000	68	13,1
400	70,8	3,4	12500	63,2	10,9
500	72,9	5,3	16000	57,6	7,6
			20000	51,2	3,8

Tab. 8: Hodnoty získané při verifikačním měření – vážené váhovým filtrem A

Korekce na hluk pozadí se neprovádí, protože rozdíl mezi hladinami akustického výkonu získaný při měření hluku zdroje a hladinami akustického výkonu hluku pozadí je větší než 15 dB.

- Je-li $\Delta L \geq 15 [dB]$ KI se rovná 0

5. Vyhodnocení výsledku:

V následující kapitole je provedena analýza výsledků. Porovnány jsou hladiny akustických výkonů získané při měření a hladiny akustických výkonů dané výrobcem referenčního zdroje hluku.

Nutno podotknout, že u referenčního zdroje hluku nejsou hladiny akustických výkonů v jednotlivých oktávách daných výrobcem váženy váhovým filtrem. Pouze celková

hladina akustického výkonu je vážená váhovým filtrem A. Hodnoty získané z měření jsou váženy váhovým filtrem A, a proto se musí hodnoty referenčního zdroje vážit váhovým filtrem A.

V tabulce 9 jsou referenční hodnoty hladin akustických výkonů ventilátoru, které jsou dány výrobcem, váženy váhovým filtrem typu A.

Frekvence [Hz]	Referenční hladiny akustického výkonu ventilátoru [dB]	Hodnoty korekcí váhového filtru A [dB]	Referenční hladiny akustického výkonu ventilátoru po vážení váhovým filtrem A [dBA]
20	63	-50,5	12,5
25	68	-44,7	23,3
32	73	-39,4	33,6
40	73	-34,6	38,4
50	72,7	-30,2	42,5
63	74,5	-26,2	48,3
80	75,8	-22,5	53,3
100	76,3	-19,1	57,2
125	76,5	-16,1	60,4
160	76,8	-13,4	63,4
200	76,7	-10,9	65,8
250	76,6	-8,6	68
315	76,5	-6,6	69,9
400	76,6	-4,8	71,8
500	76,7	-3,2	73,5
630	76,6	-1,9	74,7
800	78	-0,8	77,2
1000	79,9	0	79,9
1250	80,3	0,6	80,9
1600	80,3	1	81,3
2000	79,2	1,2	80,4
2500	78,1	1,3	79,4
3150	77,5	1,2	78,7
4000	77	1	78
5000	76,5	0,5	77
6300	75,5	-0,1	75,4
8000	74	-1,1	72,9
10000	71,4	-2,5	68,9
12500	69	-4,3	64,7
16000	66	-6,6	59,4
20000	64	-9,3	54,7

Tab. 9: Hodnoty dané výrobcem referenčního zdroje hluku – vážené váhovým filtrem A

V tabulce 10 jsou uvedeny hodnoty hladin akustického výkonu získané z měření vážené váhovým filtrem A, dále pak referenční hodnoty hladin akustického výkonu dané

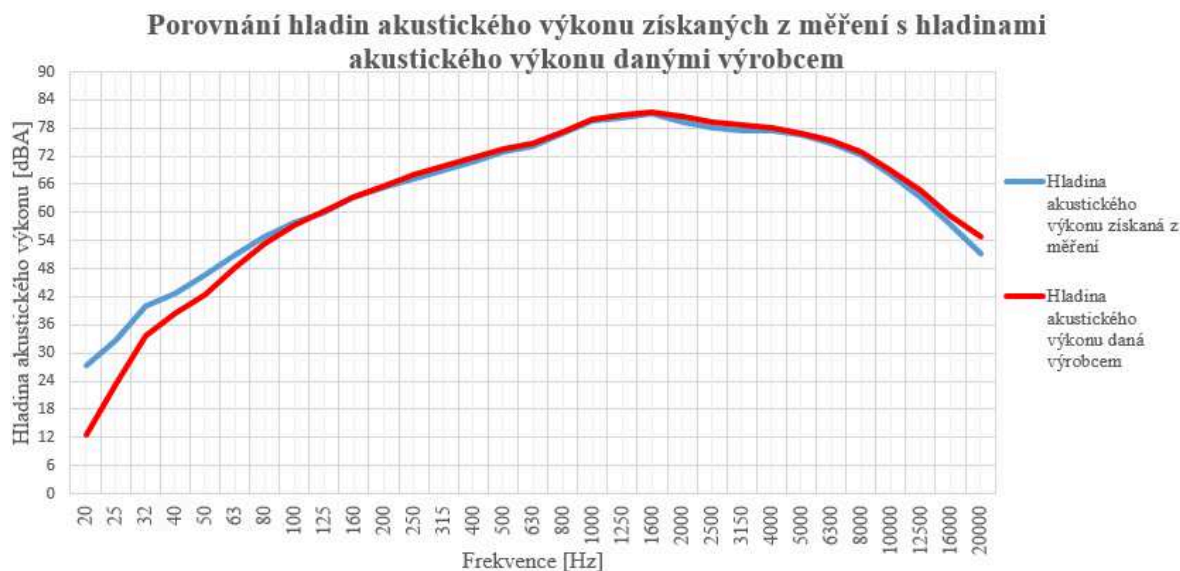
výrobce ventilátoru vážené váhovým filtrem A, a nakonec je uveden rozdíl mezi těmito hodnotami.

Frekvence [Hz]	Hladiny akustického výkonu – měření, zapnutý zdroj hluku [dBA]	Referenční hladiny akustického výkonu ventilátoru [dBA]	Rozdíl [dB]
20	27,3	12,5	14,8
25	32,8	23,3	9,5
32	40,1	33,6	6,5
40	42,6	38,4	4,2
50	46,6	42,5	4,1
63	50,8	48,3	2,5
80	54,8	53,3	1,5
100	57,7	57,2	0,5
125	60,1	60,4	-0,3
160	63,2	63,4	-0,2
200	65,4	65,8	-0,4
250	67,2	68	-0,8
315	69	69,9	-0,9
400	70,8	71,8	-1
500	72,9	73,5	-0,6
630	74,3	74,7	-0,4
800	76,9	77,2	-0,3
1000	79,7	79,9	-0,2
1250	80,2	80,9	-0,7
1600	81,1	81,3	-0,2
2000	79,4	80,4	-1
2500	78,2	79,4	-1,2
3150	77,4	78,7	-1,3
4000	77,4	78	-0,6
5000	76,7	77	-0,3
6300	74,9	75,4	-0,5
8000	72,3	72,9	-0,6
10000	68	68,9	-0,9
12500	63,2	64,7	-1,5
16000	57,6	59,4	-1,8
20000	51,2	54,7	-3,5
Celková hladina akustického výkonu [dBA]	89,1	89,8	-0,7

Tab. 10: Porovnání získaných dat z měření a dat daných výrobcem ventilátoru

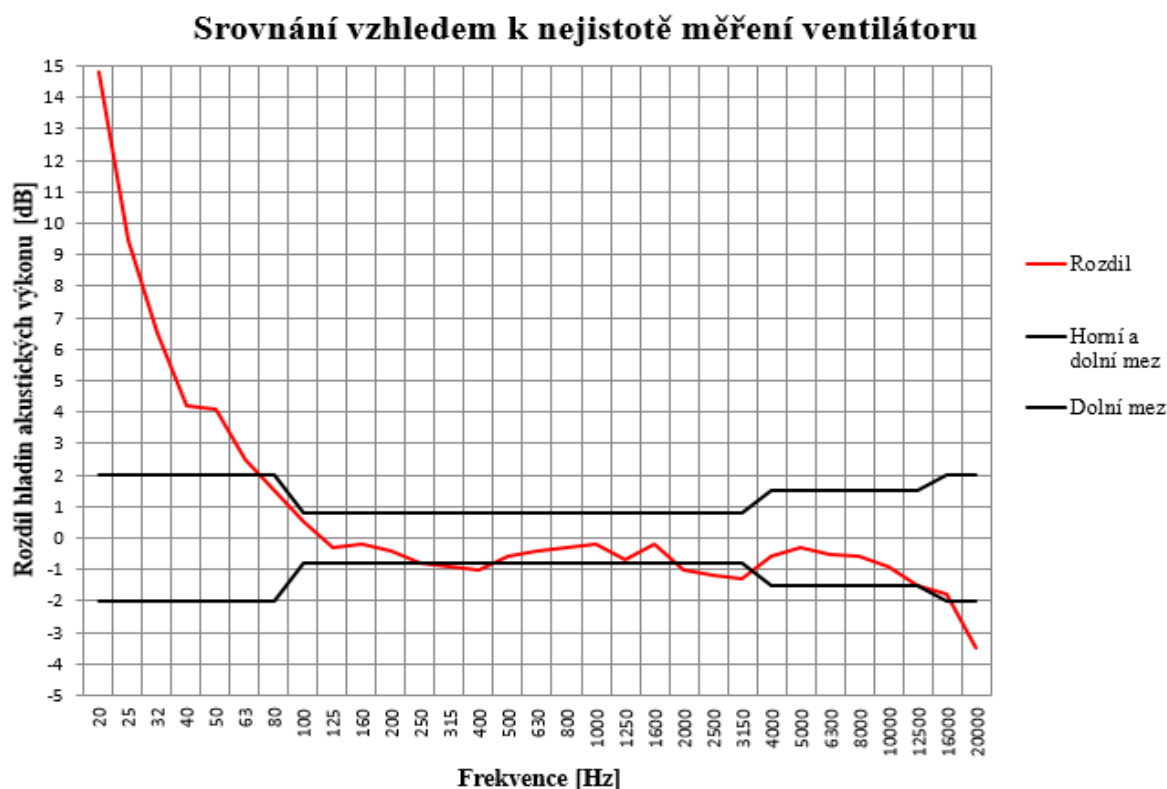
Porovnání výše uvedených dat je znázorněno i graficky na obrázku 38. Z obrázku a tabulky 10 je pak vidět, že rozdíl mezi hladinami nad 100 [Hz] danými výrobcem a

hladinami získaných z měření se pohybuje okolo hodnoty 1 [dB]. Celková hladina akustického výkonu získaná z měření je 89,1 [dBA]. Referenční hodnota celkové hladiny akustického výkonu je 89,8 [dBA]. Rozdíl mezi referenční hodnotou a měřením je 0,7 [dB].



Obr. 38: Srovnání hladin akustického výkonu získaných z měření s hladinami akustického výkonu danými výrobcem

Na obrázku 39 je vidět graf, na kterém je znázorněna nejistota měření. Nejistota měření daná výrobcem má různé toleranční pole pro různé frekvence. Toleranční pole je určeno horní a dolní mezí. Uprostřed tohoto pole by se měl pohybovat rozdíl mezi referenčními hodnotami hladin akustického výkonu, které jsou dané výrobcem a hodnotami získanými při měření hladin akustického výkonu.



Obr. 39: Srovnání s nejistotou měření ventilátoru

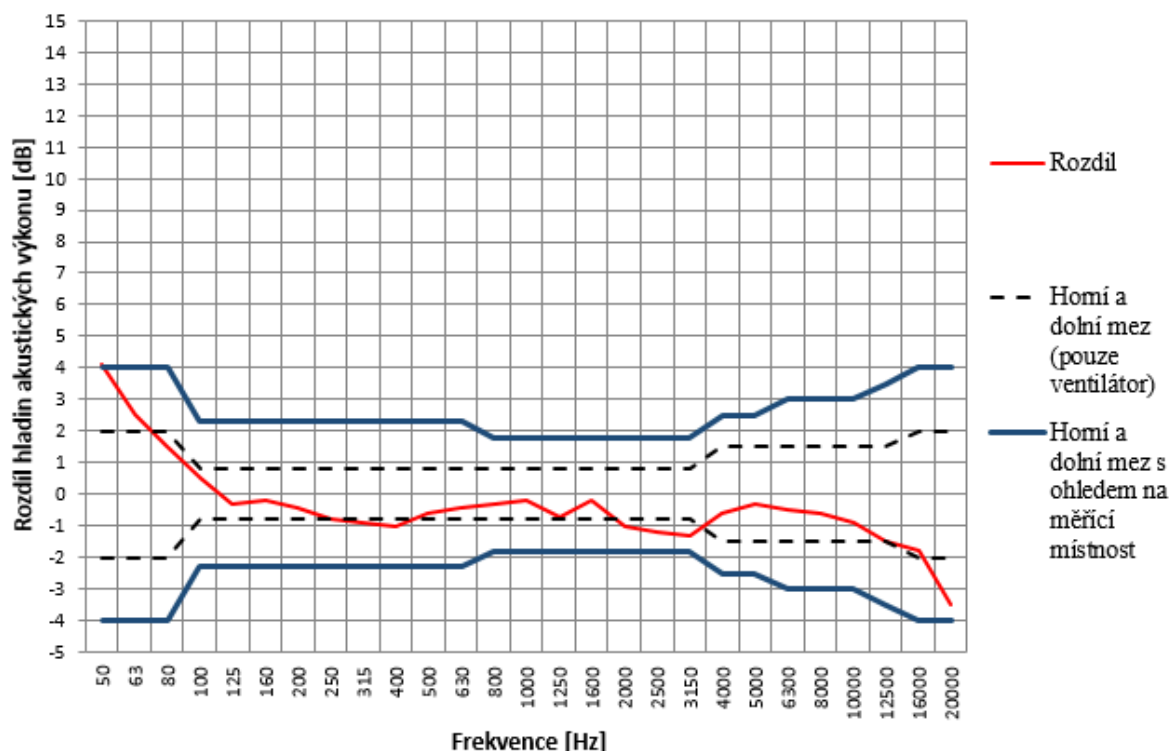
Nutno podotknout, že bezodrazová místnost ve frekvenčním rozsahu od 50 do 20 000 Hz splňuje třídu přesnosti 2. Třídu přesnosti 1 pak bezodrazová místnost splňuje při měření ve frekvenčním rozsahu od 100 – 20 000 Hz. Proto výsledky pod hodnotu frekvence 50 Hz jsou nepřesné a jsou brány jako zkreslené neboť pod touto frekvencí již dochází k odrazům zvukových vln.

Dále pak je nutné nejistotu měření zkušebního zdroje hluku rozšířit o nejistotu měření zkušební místnosti. V tabulce 11 jsou uvedeny hodnoty směrodatných odchylek pro polo bezodrazovou místnost. Hodnoty jsou uvedeny pro 2. třídu přesnosti. [12]

Střední frekvence třetinooktávového pásma [Hz]	Směrodatná odchylka reprodukovatelnosti [dB]
50 až 80	2,0
100 až 630	1,5
800 až 5 000	1,0
6 300 až 10 000	1,5
12 500 až 20 000	2,0

Tab. 11: Směrodatná odchylka pro 2. třídu přesnosti polo bezodrazové místnosti

Srovnání vzhledem k nejistotě měření ventilátoru a polobezodrazové místnosti



Obr. 40: Srovnání s nejistotou měření ventilátoru a polo bezodrazové místnosti

Na obrázku 40 je uveden graf s nejistotou měření ventilátoru rozšířený o nejistotu měření polo bezodrazové místnosti. Bezodrazová místnost ve frekvenčním rozsahu od 50 Hz – 20 000 Hz splňuje třídu přesnosti 2. Na vodorovné ose jsou zobrazeny třetinooktávová pásma se středními frekvencemi od 50 Hz - 20 000 Hz. Z grafu je vidět, že rozdíl mezi referenčními hodnotami hladin akustického výkonu danými výrobcem a hodnotami hladin akustického výkonu získanými z měření nepřesahuje toleranční pole nejistoty měření ventilátoru a polo bezodrazové místnosti. Tím pádem lze usoudit, že hemisféra pracuje správně.

6. Závěr:

Předložená diplomová práce se zabývá technickým návrhem hemisféry, která slouží pro měření akustického výkonu dle normy ČSN ISO 3745. Norma specifikuje měření v polo bezodrazové místnosti. Předmětem této práce je rovněž i základní návrh matematického modelu pro výpočet hladiny akustického výkonu.

V teoretickém rozboru této práce byly probrány fyzikální zákony a veličiny, které stojí za podstatou vzniku zvuku. Dále pak byla popsána základní terminologie z oblasti zvuku. Celá tato kapitola směřovala k uvedení do problematiky měření hluku a určení hladiny akustického výkonu. Nakonec zde byly shrnuty výhody a nevýhody jednotlivých metod měření pro zjištění hladiny akustického výkonu.

V následující kapitole byl proveden rozbor metody měření dle ČSN ISO 3745. V této kapitole byly popsány typy akustických místností, dále pak typy zdrojů hluku, podmínky měření a nakonec polohy měřících bodů, které specifikuje tato norma.

Zadání této diplomové práce je od společnosti Honeywell, a proto v následující kapitole byly rozebrány požadavky této společnosti. Honeywell je nadnárodní společnost, která má v Brně postavenou bezodrazovou místnost. Dále byl proveden průzkum trhu s cílem nalézt dostupné hemisféry pro měření hladin akustického výkonu.

V praktické části práce je pak proveden technický návrh. Jsou zde popsány prvky, ze kterých se hemisféra skládá. Dále je zde ve vývojovém diagramu popsán postup výpočtu pro určení hladin akustického výkonu. V návaznosti je zde provedeno verifikační měření, pro ověření správné funkce celého systému. Je zde popsáno samotné měření, použité přístroje a jsou zde zobrazeny výsledky měření. V tomto měření se měřil hluk generovaný z referenčního zdroje. Referenční hodnoty hladin akustického výkonu zdroje hluku (ventilátoru) jsou dány výrobcem a slouží k porovnání s naměřenými hodnotami.

V poslední kapitole bylo provedeno vyhodnocení získaných dat a posouzení správné funkce celého měřicího systému. Celková naměřená hladina akustického výkonu referenčního zdroje dosahovala hodnoty 89,1 [dBA]. Odchylka od celkové hladiny akustického výkonu referenčního zdroje daná výrobcem byla 0,7 [dB]. Zdroj zvuku při měření generoval hluk s určitou nejistotou měření. Rozdíly hladin akustického výkonu mezi naměřenými hodnotami a referenčními hodnotami v jednotlivých třetinooktávových pásmech nepřesahovaly hodnoty tolerančního pole nejistoty měření ventilátoru a polo bezodrazové místnosti ve frekvenčním rozsahu od 50 – 20 000 Hz. Z tohoto důvodu lze usoudit, že navržená hemisféra funguje správně.

7. Seznam použité literatury:

- [1] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. 2. vydání. Praha: ČVUT, 1995. ISBN 80-010-2246-3.
- [2] GEIST, Bohumil. *Akustika: jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*. Praha: Muzikus, 2005. ISBN 80-862-5331-7.
- [3] Akustika. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Akustika>
- [4] Zvuk. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Zvuk>
- [5] Historie měření rychlosti zvuku. In: *Fyzmatik.píše* [online]. 2010 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/184-historie-mereni-rychlosti-zvuku.html>
- [6] JAKSCH, Ivan. *Technická diagnostika: Základy akustiky a hlukové diagnostiky*. Liberec, 2010.
- [7] MACHÁČEK, Martin. *Encyklopedie fyziky*. 1. vyd. Praha: Mladá fronta, 1995. 408 s. ISBN 80-204-0237-3.
- [8] KAŇKA, Jan. *Šíření zvuku v uzavřeném prostoru: Difuzní zvukové pole*. ČVUT Praha.
- [9] JENČÍK, Josef a Ludvík KUHN. *Technická měření ve strojnictví*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1982. ISBN 175387-14787/82.
- [10] Rychlost zvuku. *Fyzika 007* [online]. Praha: Katedra didaktiky fyziky [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/mechanicke-kmitani-a-vlneni/rychlost-zvuku>
- [11] G.R.A.S. *Sound and Vibration* [online]. [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <http://www.gras.dk/67ha-lemo.html>
- [12] *Akustika - Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [13] *Kinematika: Decibelové veličiny v akustice, kmitočtová pásma* [online]. 2010 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_03.pdf

- [14] G.R.A.S. *Sound and Vibration* [online]. Denmark [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.gras.dk/46ae.html>
- [15] 1_Lidská fyziologie. *Katedra Aplikované mechaniky Fakulta strojní, VŠB TU-Ostrava* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/1_Lidska-fyziologie.pdf
- [16] 2_Akustická pole. *Katedra Aplikované mechaniky Fakulta strojní, VŠB TU-Ostrava* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/2_Akusticka-pole.pdf
- [17] 3_Stupnice a oktávy. <https://www.fs.vsb.cz/330/cs> [online]. Ostrava [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/3_Stupnice-a-oktavy.pdf
- [18] 4_Zpracování akustických veličin. *Katedra Aplikované mechaniky Fakulta strojní, VŠB TU-Ostrava* [online]. Ostrava [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/4_Zpracovani-akustickych-velicin.pdf
- [19] 5_Měření akustického výkonu tlak. *Katedra Aplikované mechaniky Fakulta strojní, VŠB TU-Ostrava* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/5_Mereni-akustickeho-vykonu-tlak.pdf
- [20] 6_Měření akustického výkonu intenzita. *Katedra Aplikované mechaniky Fakulta strojní, VŠB TU-Ostrava* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/6_Mereni-akustickeho-vykonu-intenzita.pdf
- [21] RUSZ, Roman. *Pokročilé metody hodnocení impulsních hluků*. Ostrava, 2013. Bakalářská práce. VŠB Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechaniky. Vedoucí práce Weisz, M.
- [22] CINKRAUT, Jakub. *Měření přenosových vlastností reproduktorových systémů*. Ostrava, 2013. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Weisz, M.
- [23] JANURA, Lukáš. *Měření silničního hluku - statistická metoda při průjezdu*. Univerzita Pardubice, 2015.

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu, panu Ing. Michalu Weiszovi za užitečné rady, doporučení a vstřícné konzultace při vypracovávání této práce. Dále bych chtěl poděkovat kolektivu výzkumné experimentální hlukové laboratoře za jejich užitečné rady, které také přispěly ke vzniku této práce.